



MİLLİ  
AVİASIYA  
AKADEMİYASI



# SÜNİ İNTELLEKT TEXNOLOGİYALARI VƏ AEROKOSMİK PROBLEMLƏR

MÖVZUSUNDA III BEYNƏLXALQ ELMİ-PRAKTİK KONFRANS



○ ○ ○

08-09 iyul  
2025

**«AZƏRBAYCAN HAVA YOLLARI» QSC  
MİLLİ AVİASIYA AKADEMİYASI**

**“SÜNİ İNTELLEKT  
TEKNOLOGİYALARI  
VƏ AEROKOSMİK PROBLEMLƏR”  
MÖVZUSUNDA**

**III**

**Beynəlxalq Elmi-praktik konfransın  
MATERIALLARI**

**Bakı  
8-9 iyul 2025-ci il**

**Redaktor:** Təbriz Osmanlı

**Sədr:** MAA-nın rektoru,  
akademik **Arif Paşayev**

**Təşkilat  
komitəsinin sədri:** MAA-nın yeni texnologiyalar üzrə  
prorektoru, professor **Xəqani Abdullayev**

**Proqram  
komitəsinin sədri:** MAA-nın birinci prorektoru,  
professor **Ədalət Səmədov**

**Məsul katib:** Dosent **Fuad Dadaşov**

**Katib:** **Elnur Əsədov**  
**Təbriz Osmanlı**

## Z-IMPLICATION AND ITS APPLICATION



**Ahmadov Sh.A.**

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan  
ahmadov.shamil@asoiu.edu.az

**Abstract.** Fuzzy logic has a wide range of applications from a theoretical and practical point of view. One of the main components of fuzzy logic is fuzzy implication, which allows modeling uncertain conditions and consequences. Fuzzy implications are also widely used in scientific literature and are characterized by numerous areas of application. Unlike the binary truth system of classical logic, fuzzy implication allows modeling cases where truth is uncertain and graded. However, there are a number of difficulties in applying fuzzy implications. One of them is the choice of a suitable implication operator. In addition, many fuzzy implication operators do not fully satisfy all the laws of classical logic. This can lead to incorrect results in some cases. The above shortcomings raise the issue of expanding fuzzy implications. This creates the need to create new types of implications. In this article, we will consider Z-implication, which allows jointly modeling both imprecise and probabilistic information, and its application. Currently, the concept of 'Z-implication' is not encountered in the existing scientific literature.

**Keywords:** information processing, fuzzy logic, fuzzy implications, Z-set, IF-THEN rules, Z-implication, probabilistic implication

**Introduction.** Fuzzy implications are a valuable tool for supporting decision-making processes grounded in human reasoning, which is often characterized by imprecision, uncertainty, and incompleteness. These implications play a critical role in judgments where data is not strictly binary or deterministic. The foundational work in this domain was conducted by Bandler and Kohout [1], who demonstrated that implications are particularly important for modeling human reasoning and for applications in natural language processing. Through fuzzy implications, it becomes possible to formalize the vagueness inherent in human logic and transform it into a computationally interpretable structure.

Fuzzy implications enhance decision-making under uncertainty by enabling the representation of knowledge in the form of IF-THEN rules, thus supporting flexible, rule-based reasoning systems. However, their practical use comes with challenges: processing a large set of fuzzy rules can be computationally intensive, and the evaluation of resulting inferences -especially when multiple fuzzy relational matrices are involved -can be complex. Unlike classical logic, which operates with binary truth values (true or false), fuzzy logic accommodates degrees of truth, which may pose issues in domains requiring high precision.

The concept of linguistic variables and their application to approximate reasoning was first introduced by Zadeh [2]. Zadeh wrote in his famous three-article study: "probabilities, too, can be treated as linguistic variables with values such as likely, very likely, unlikely, etc. Computation with linguistic probabilities requires the solution of nonlinear programs and leads to results which are imprecise to the same degree as the underlying probabilities. The main applications of the linguistic approach lie in the realm of humanistic systems – especially in the fields of artificial intelligence, linguistics, human decision processes, pattern recognition, psychology, law, medical diagnosis, information retrieval, economics and related areas".



Probability theory does not provide any answer to the problem of combining two probability dimensions in the same space, because it is clear that this is a problem of judgment, not mathematics. In [3], the authors explained three ways to solve approximate reasoning problems. These ways belong to expert systems based on deductive logic; to the broad classical rules of deductive reasoning; and to mathematical models of approximate reasoning. All statistical reasoning is probabilistic, but not all probabilistic reasoning is statistical.

The synthesis of the combined model, covering both probabilistic and fuzzy uncertainty, is one of the relatively relevant research topics. To date, many studies have been conducted in this area, which considered such approaches as fuzzy belief networks, fuzzy rule-based belief systems, combining fuzzy and probabilistic data, etc. d. [4–7]. Based on the above, combining various types of uncertainties is considered one of the popular directions of modern scientific research. In this regard, the Z-number concept can be considered as a potentially excellent approach for adequately combining fuzzy and probabilistic uncertainty.

In recent developments, probabilistic versions of fuzzy implications have been introduced. Some fuzzy implications now satisfy properties of probabilistic reasoning, blending fuzziness with statistical uncertainty.

Nevertheless, traditional fuzzy implications often fall short of simultaneously representing both imprecise and probabilistic information. This limitation has led to the introduction of a new form of implication known as Z-implication. first defined in [8]. Z-implication aims to bridge the gap between fuzzy and probabilistic reasoning, offering a more comprehensive tool for handling uncertainty in complex decision-making systems.

This article explores the concept of Z-implication and its potential applications.

**Purpose of work.** The problem we are considering is to consider and apply a new approach that allows us to overcome the shortcomings of existing fuzzy implication models. This is a relevant and important area of research for the development of modern fuzzy inference systems, both from a theoretical and practical point of view. The approaches proposed by Zadeh and other authors are widely used in decision-making systems based on fuzzy logic. However, the main limitation of fuzzy logic is that it does not take into account the reliability of information. The weakness of probability theory lies in the uncertainty and incompleteness of information, which reduces its effectiveness in real applications. The Z-concept combines the strengths of fuzzy logic and probability theory, allowing for the simultaneous modeling of inaccurate and partially reliable information.

**Problem formulation and solution method.** Let's examine the concepts used in the algorithm.

**Definition 1** [8]. We consider a problem of formulating an implication denoted  $I_Z$  (Z-implication) given two Z-numbers  $Z_1 = (A_1, B_1)$  and  $Z_2 = (A_2, B_2)$ .  $I_Z$  may be described in terms of mapping between pairs of fuzzy sets  $(A_1, B_1), (A_2, B_2)$  taking into account underlying sets of cumulative probability distributions:

$$G_1 = \{u: \int p_1 = u, \sum p_1 \mu_{A_1} \in B_1\}, G_2 = \{v: \int p_2 = v, \sum p_2 \mu_{A_2} \in B_2\}. \quad (1)$$

Consequently, fuzzy implication and probabilistic implication would be a basis for formulating Z-implication  $I_Z$  as follows.

Z-implication  $I_Z$  is a vector-valued function defined as a product of two vectors:

$$I_Z = I_{FC}K = (I_F(\mu_{A_1}, \mu_{A_2}), \{I_C(u, v): u \in G_1, v \in G_2\})K, \quad (2)$$

where  $I_F$  and  $I_C$  are ALI-1 fuzzy implication and probabilistic implication respectively. The second component of the vector-valued function  $I_{FC} = (I_F(\mu_1, \mu_2), \{I_C(u, v)\})$  is a set of probabilistic implications  $\{I_C(u, v)\}$  induced by sets of cumulative distributions  $G_1, G_2$ .(1).

$K$  is a binary two-dimensional column vector  $K = (k_1, k_2)^T$ ,  $k_1, k_2 \in \{0,1\}$ . As special cases of Z-implication one has:

If  $k_1 = 1, k_2 = 0$  then  $I_Z$  is a fuzzy implication.

If  $k_1 = 0, k_2 = 1$  then  $I_Z$  is a set of probabilistic implications.

Z-implication (2) is obtained in general case when  $k_1 = 1, k_2 = 1$ .

**Definition 2 [9].** Aggregation probability distributions (probability aggregation method performed by computing the weighted sum):

$$P_G(p) = \sum_{i=1}^n w_i P_i(p) \quad (3)$$

In the equation,  $w_i$  are positive weighting factors: in order to have a meaningful global probability, their sum must be equal to 1.

Algorithm: Using If-Then rules express Z-modus ponens as Given: If  $X$  is

$$Z_{i1}(A_{i1}, B_{i1}) \text{ Then } Y \text{ is } Z_{i2}(A_{i2}, B_{i2}) \quad i = \overline{1, n}, \text{ IF } X \text{ is } Z'_1(A', B') \quad (4)$$

Define  $Y$  is  $Z'_2(A', B')$

The problem is solved as:

Step 1. Using definition 1, construct Z-implication  $I_{Zi}$  for each rule  $i=1, n$ :

1.1 Compute fuzzy implication  $I_{Fi}(\mu_{A_1}, \mu_{A_2})$

1.2 Construct probabilistic implication  $I_{Ci}(u, v)$

Extract sets of cumulative probability distributions:

$$G_1 = \{u: \int p_1 = u, \sum p_1 \mu_{A_1} \in B_{11}\}, G_2 = \{v: \int p_2 = v, \sum p_2 \mu_{A_2} \in B_{21}\} \quad (5)$$

1.3 Calculation of copula  $Ci(u, v)$  for each  $u, v$  (5).

1.4 Construct Probabilistic implication [10]

$$I_{Ci}(u, v) = \begin{cases} 1, & u = 0 \\ \frac{Ci(u, v)}{v}, & u > 0 \end{cases} \quad (6)$$

1.5. Forming Z-implication:

$$I_{Zi} = I_{FCi} K = (I_{Fi}(\mu_{A_1}, \mu_{A_2}), \{I_{Ci}(u, v): u \in G_1, v \in G_2\}) K, K = (k_1 = 1, k_2 = 1)^T \quad (7)$$

Step 2. Aggregation matrices of created Z-implications(7) to obtain one Z-implication:

$I_Z = \text{Agg}(I_{Zi})$ :

2.1. Fuzzy relations are aggregated as

$$R = \cup R_s, s = 1, \dots, n,$$

where  $R_s \subseteq \tilde{E}_i \times \tilde{U}_j$

2.2. Probabilistic implication matrices are aggregated by using (3) Def. 2

Step 3. Calculation of output  $Z'_2(A_2', B_2')$  using composition of new Z-input  $Z'_1(A_1', B_1')$  and aggregated  $I_Z$ :

3.1 Compute Composition of A parts:  $A_2' = A_1' R_s$ ;

3.2 Compute composition of  $u' \in G'_1$  and  $\text{Agg}(I_C(u, v))$  to obtain  $v' \in G'_2$

3.3 Compute  $B_2'$  given  $A_2'$  and  $G'_2$ :  $B_2'(\int_x A(x)p(x)dx) = G'_2(v'), v' = \int p(x)$ .

Thus,  $Z'_2(A_2', B_2')$  is computed.

**Numerical example.** IF A1 THEN B1

$$\mu_E(e) = 1.00/-10 + 0.73/-7 + 0.34/-3 + 0.20/0 + 0.13/3 + 0.08/7 + 0.06/10$$

$\mu_U(u) = 1.00/-1 + 0.92/-0.7 + 0.67/-0.3 + 0.50/0 + 0.37/0.3 + 0.26/0.7 + 0.20/1$   
Created fuzzy relation matrices using ALI-I implication are below (Table 1):

Table 1  
Fuzzy relation matrix R1

|      | 1    | 0.92 | 0.67 | 0.5  | 0.37 | 0.26 | 0.2  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1    | 1    | 0.92 | 0.67 | 0.5  | 0.37 | 0.26 | 0.2  |
| 0.73 | 0.27 | 0.27 | 0.67 | 0.5  | 0.37 | 0.26 | 0.2  |
| 0.34 | 0.66 | 0.66 | 0.66 | 0.66 | 0.66 | 0.26 | 0.2  |
| 0.2  | 0.8  | 0.8  | 0.8  | 0.8  | 0.8  | 0.8  | 1    |
| 0.13 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 |
| 0.08 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.92 |
| 0.06 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | 0.94 |

Let's look at the verification of the fuzzy implication properties below.

**Example 1.**

(I1): if  $x_1 \leq x_2$  then  $I(x_1, y) \geq I(x_2, y)$ ,

Value of variables and implication are:  $X_1=0.13$ ,  $x_2=0.2$ ,

$I(x_1, y)=0.87$ ,  $I(x_2, y)=0.8$

$0.13 \leq 0.2$  and  $0.87 \geq 0.8$

it satisfies the (I1) conditions for all  $x, x_1, x_2, y, y_1, y_2 \in [0, 1]$  (see Table 1).

(I2): if  $y_1 \leq y_2$  then  $I(x, y_1) \leq I(x, y_2)$ ,

Let  $y_1=0.67$  and  $y_2=0.92$ ,  $I(x, y_1)=0.67$  and  $I(x, y_2)=0.92$ ,

$y_1=0.67 \leq y_2=0.92$  then  $I(x, y_1)=0.67 \leq I(x, y_2)=0.92$ ,

it satisfies the (I2) conditions for all  $x, x_1, x_2, y, y_1, y_2 \in [0, 1]$  (see Table 1).

.....

(I3):  $I(0, 0)=1$ ,

Assume that  $x_1=0$  and  $y_1=0$  Then[8]

$$I(x, y) = \begin{cases} 1-x, & \text{if } x < y \\ 1, & \text{if } x = y \\ y, & \text{if } x > y \end{cases}$$

In ALI-1 implication if  $x=0$  and  $y=0$  Then

$I(x, y)=1$  or  $I(0, 0)=1$

it satisfies the (I3) conditions for all  $x, x_1, x_2, y, y_1, y_2 \in [0, 1]$

(I4):  $I(1, 1)=1$ ,

$X=1$  and  $y=1$

it satisfies the (I4) conditions for all  $x, x_1, x_2, y, y_1, y_2 \in [0, 1]$ , (see Table)

(I5):  $I(1, 0)=0$ ,

if  $x=1$  and  $y=0$ ,  $x > y$  then  $I(1, 0)=0$

it satisfies the (I5) conditions for all  $x, x_1, x_2, y, y_1, y_2 \in [0, 1]$ .

We are getting:

If  $k_1 = 1, k_2 = 0$  then  $I_Z$  is a fuzzy implication.

Let's look at the verification of the probabilistic implication properties below [10].

A probabilistic implication (3)  $I_c : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$  for any copula C (6) satisfies the following conditions:

- 1)  $I(0,0)=1$
- 2)  $I(1,1)=1$
- 3)  $I(1,0)=0$
- 4) If  $v1 \leq v2$  then  $I(u, v1) \leq I(u, v2)$ .

$$I_c(x, y) = \begin{cases} 1-x, & \text{if } x < y \\ 1, & \text{if } x = y \\ y, & \text{if } x > y \end{cases}$$

Below is a relation matrix constructed using copula (Table 2) .

Table 2  
Relation matrix constructed using copula

|          | 0.102587 | 0.25778  | 0.467194 | 0.672929 | 0.851013 | 0.992232 | 1        |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| 0.135958 | 0.102587 | 0.864042 | 0.864042 | 0.864042 | 0.864042 | 0.864042 | 0.864042 |
| 0.583634 | 0.102587 | 0.25778  | 0.467194 | 0.416366 | 0.416366 | 0.416366 | 0.416366 |
| 0.892009 | 0.102587 | 0.25778  | 0.467194 | 0.672929 | 0.851013 | 0.107991 | 0.107991 |
| 1        | 0.102587 | 0.25778  | 0.467194 | 0.672929 | 0.851013 | 0.992232 | 1        |
| 1        | 0.102587 | 0.25778  | 0.467194 | 0.672929 | 0.851013 | 0.992232 | 1        |
| 1        | 0.102587 | 0.25778  | 0.467194 | 0.672929 | 0.851013 | 0.992232 | 1        |

### Example 2.

If  $v1=0.102587$ ,  $v2=0.25778$  then we get

$I(u, v1) \leq I(u, v2)$ :

$1 \leq 1$ ;

$0.102587 \leq 0.864042$

$0.102587 \leq 0.25778$

Given implication satisfies the properties of fuzzy and probabilistic implication [8,10,11].

Assume, that the new input and its cumulative probability as below:

(0, 0, 0.038604, 0.274913, 0.513237, 0.173247, 0) and (0, 0, 0.07564, 0.643455, 0.513237, 0.991803, 1,1,1)

Created matrix using probabilistic implication is given below (Table 3):

Table 3  
Created matrix using probabilistic implication

| 1 | 1        | 1        | 1        | 1        | 1 | 1 |
|---|----------|----------|----------|----------|---|---|
| 0 | 0        | 0        | 0        | 0.629455 | 1 | 1 |
| 0 | 0        | 0.188768 | 0.618903 | 0.956441 | 1 | 1 |
| 0 | 0.157702 | 0.473695 | 0.752754 | 0.97174  | 1 | 1 |
| 0 | 0.164606 | 0.478009 | 0.754781 | 0.971972 | 1 | 1 |
| 0 | 0.164606 | 0.478009 | 0.754781 | 0.971972 | 1 | 1 |
| 0 | 0.164606 | 0.478009 | 0.754781 | 0.971972 | 1 | 1 |

Using one rule (Table 1) and new input (0.67, 0.17, 0.32, 0.59, 0.56, 0.3, 0.41) and one probability (0, 0, 0.038604, 0.274913, 0.513237, 0.173247, 0) and its cumulative probability (0, 0, 0.07564, 0.643455, 0.513237, 0.991803, 1, 1, 1) is obtained the following result:

$Z(A,p)=(0.67, 0.67, 0.67, 0.59, 0.59, 0.59, 0.59), (0, 0.156354, 0.309304, 0.283321, 0.222331, 0.028691, 0)$

**Conclusion.** In this work, the limitations of fuzzy implications and the importance of their expansion were considered. For this purpose, as a result of the research conducted, it was determined that the existing implications cannot take into account the reliability of information when modeling using IF–THEN rules, and this does not exist to this day. In this work, the characteristics of fuzzy and probabilistic implications were investigated, and the characteristics of the existing implication were checked. The control problem was solved based on the logical inference algorithm using a new Z-implication, which combines the characteristics of probabilistic and fuzzy implications. When formulating the problem to express this process, a rule and a 1-distribution were used. This approach will allow to increase the predictability and practical application areas of fuzzy inference systems. There is no work in the scientific literature in the field of the proposed approach, so it can be useful in real areas such as various engineering fields, medicine, economics, and human-oriented decision-making processes via information email.

### References

1. Bandler, W., & Kohout, L. J. (1980). Fuzzy power sets and fuzzy implication operators. *Fuzzy Sets and Systems*, 4(1), 13–30.  
[https://doi.org/10.1016/0165-0114\(80\)90019-4](https://doi.org/10.1016/0165-0114(80)90019-4)
2. Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I, II, III. *Information Sciences*, 8, 199–249, 301–357; 9, 43–80.  
[https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5)
3. Alberto, B., & Fulvio, T. (2010). Approximate reasoning. In *Bounding uncertainty in civil engineering* (pp. 255–308). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-90-481-3632-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3632-7_8)
4. Couso, I., & Dubois, D. (2015). A perspective on the extension of stochastic orderings to fuzzy random variables. In *Proceedings of the 16th World Congress of the International Fuzzy Systems Association (IFSA)* (pp. 1486–1492).  
<https://doi.org/10.1109/IFSA.2015.7275580>
5. Zhou, S., Chen, Q., & Wang, X. (2014). Fuzzy deep belief networks for semi-supervised sentiment classification. *Neurocomputing*, 131, 312–322.  
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.10.005>
6. Dubois, D., & Prade, H. (2015). Possibility theory and its applications: Where do we stand? In J. Kacprzyk & W. Pedrycz (Eds.), *Springer handbook of computational intelligence* (pp. 31–60). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-662-43505-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-43505-2_2)
7. Dubois, D., Liu, W., Ma, J., & Prade, H. (2016). The basic principles of uncertain information fusion: An organized review of merging rules in different representation frameworks. *Information Fusion*, 32, 12–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.02.002>
8. Aliev, R. A., Ahmadov, Sh. A., Gardashova, L. A., & Huseynov, O. H. (2025). Extension of ALI-I logic to Z-fuzzy environment. In *Proceedings of the 12th International Conference on*

- Theory and Application of Soft Computing, Computing With Words, Perception and Artificial Intelligence (ICSCCW-2024) (in press). Montenegro.
9. Aliev, R. A., & Gardashova, L. A. (2021). Z-set based approach to control system design. In Proceedings of the 14th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing (ICAFS-2020) (pp. 10–21). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-64058-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64058-3_2)
  10. Grzegorzewski, P. (2013). Probabilistic implications. Fuzzy Sets and Systems, 226, 53–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2012.12.008>
  11. Zadeh, L. A. (2010). A note on Z-numbers. Information Sciences, 181(14), 2923–2932.  
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2010.04.030>

## Z-İMPLİKASIYA VƏ ONUN TƏTBİQİ

Əhmədov Ş. A.

**Xülasə.** Qeyri-səlis məntiqin həm nəzəri, həm də praktiki baxımdan geniş tətbiq sahələri mövcuddur. Qeyri-səlis məntiqin əsas komponentlərindən biri olan qeyri-səlis implikasiya qeyri-müəyyən şərtləri və nəticələri modelləşdirməyə imkan verir. Qeyri-səlis implikasiyalar elmi ədəbiyyatda geniş şəkildə istifadə olunur və çoxsaylı tətbiq sahələri ilə xarakterizə olunur. Klassik məntiqin ikili həqiqət sistemindən fərqli olaraq, qeyri-səlis implikasiya həqiqətin qeyri-müəyyən və mənsubluğun olduğu vəziyyətləri modelləşdirməyə imkan yaradır. Lakin qeyri-səlis implikasiyaların tətbiqində bir sıra çətinliklər mövcuddur. Bu çətinliklərdən biri uyğun implikasiya operatorunun seçilməsi ilə bağlıdır. Eyni zamanda, bir çox qeyri-səlis implikasiya operatorları klassik məntiqin bütün qanunlarını tam şəkildə təmin etmir ki, bu da bəzi hallarda düzgün olmayan nəticələrə səbəb ola bilər. Bu nöqsanlar qeyri-səlis implikasiyaların genişləndirilməsi problemini ortaya çıxarır və yeni tip implikasiya operatorlarının yaradılmasına ehtiyac yaradır. Bu məqalədə həm qeyri-dəqiq (imprecise), həm də ehtimal xarakterli (probabilistic) informasiyanın birgə modelləşdirilməsinə imkan verən Z-implikasiya və onun tətbiqinə baxılır. Hazırda mövcud elmi ədəbiyyatda "Z-implikasiya" anlayışına rast gəlinmir.

**Açar sözlər:** informasiya emalı, qeyri-səlis məntiq, qeyri-səlis implikasiya, Z-çoxluq, ƏGƏR-ONDA qaydaları, Z-implikasiya, ehtimal implikasiya



## MÜASİR DÜNYADA SÜNİİNTELLEKTİN PROBLEMLƏRİ VƏ HƏLL YOLLARI BARƏSİNDƏ DÜŞÜNCƏLƏR



**İsmayilov İ.M.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan

ismayil.maa@gmail.com

**Annotasiya.** Hal-hazırda dünyada süni intellekt sistemləri müasir informasiya texnologiyalarının inkişafının praktiki olaraq bütün digər istiqamətlərinə nüfuz edən və onlarda inqilabi dəyişikliklər yaradan sistemlərə aiddir. Təbii ki, təhsil, səhiyyə, nəqliyyat, iqtisadiyyat və bir çox digər sahələrdə süni intellektdən istifadə misli görünməmiş faydalar verir, lakin eyni zamanda, intellektual mülkiyyətin inkişafı strategiyasının hazırlanması zamanı diqqətdən kənarda qalması mümkün olmayan müəyyən risklər və təhlükələr də yaradır. Süni intellekt texnologiyalarına həddən artıq etibar etmək cəmiyyətin bəzi hissələrində insan təsirinin itirilməsinə və insan fəaliyyətinin olmamasına səbəb ola bilər. Süni intellektin bəzi inanılmaz üstünlükləri olsa da, onun xüsusilə kibertəhlükəsizlik, sosial və etik problemlərlə bağlı çatışmazlıqlarını nəzərdən qaçırmamaq olmaz. Bu onu göstərir ki, süni intellektin faydalarını maksimuma çatdırmaqla yanaşı onun risklərini azaltmaq üçün texnoloji tərəqqiyə və etikaya balanslaşdırılmış vahid yanaşma tələb olunacaq. Buna görə də onun potensialını və təhlükələrini anlamaq üçün süni intellektlə bağlı tədqiqatları davam etdirmək və riskləri minimuma endirmək üçün strategiyalar hazırlamaq mühümdür. Qeyd olunanları nəzərə alaraq məqalədə müasir dövrdə müxtəlif sahələrdə süni intellektin tətbiqi və onun effektivliyi, tətbiq sahəsindən asılı olaraq qarşıya çıxan problemlər, həmçinin süni intellektin mümkün ola biləcək təhlükələri və onun risklərinin idarə olunması yolları araşdırılır. Burada əsas diqqət süni intellektin tətbiq edildiyi təhsil, səhiyyə, iqtisadiyyat, sosial şəbəkə və kibertəhlükəsizlik kimi sahələrdə onun yaratdığı problemlərə baxılır və həmin problemlərin aradan qaldırılması yolları barəsində müxtəlif düşüncələr təqdim olunur.

**Açar sözlər:** süni intellekt, intellektual sistemlər, süni intellekt alqoritmləri, maşın öyrədilməsi, süni intellektin etik problemləri, süni intellektin sosial problemləri

**Giriş.** Son zamanlar süni intellekt (Sİ) elm və texnologiya dünyasının ən aktual mövzularından birinə çevrilmişdir. Bu texnologiya inkişaf etdikcə bəzi insanlar bunu bəşəriyyətin üzləşdiyi bir çox problemlərin həlli kimi görür, digərləri isə süni intellektin fəlakətli nəticələr verə biləcəyindən həyəcan keçirirlər, belə ki, yaradıcı başlanğıclar üçün generativ süni intellektin tətbiqi insanın yaradıcılığını və emosional ifadəsini azalda bilər. Mütəxəssislərin fikrincə qarşıdan gələn illərdə süni intellekt məxfilik və şəxsi məlumatların qorunması, alqoritmik qərəzlilik və şəffaflıq etikas, həmçinin iş yerlərinin itirilməsinin sosial-iqtisadi təsiri ilə bağlı problemlərlə daha çox üzləşəcək. Süni intellektin bəzi inanılmaz üstünlükləri olsa da, onun kibertəhlükəsizlik və etik problemlərlə bağlı çatışmazlıqlarını nəzərdən qaçırmamaq olmaz. Bu onu göstərir ki, süni intellektin faydalarını maksimuma çatdırmaqla yanaşı onun risklərini azaltmaq üçün texnoloji tərəqqiyə və etikaya balanslaşdırılmış və vahid yanaşma tələb olunacaq. Süni intellektin müxtəlif tətbiq sahələrində yaratdığı bir sıra problemlərin şərhinə nəzər salaq.

Bu cür problemlərdən biri ondan ibarətdir ki, hal hazırda süni intellekt sistemləri yox, ciddi müəyyən məsələləri yerinə yetirmək qabiliyyətinə malik olan proqramlar yaradılırlar, bu şərtlə ki, insan onları buna öyrədirlər. Onlar öyrədilirlər, lakin nə etdiklərini başa düşmürlər. Maşın

öyrədilməsi məsələnin qoyuluşundan və onun maksimal səmərəli şəkildə həll edilməsi üçün kompüterə imkanın verilməsindən ibarətdir. Maşının nə etdiyini başa düşməməsi səbəbindən hər şey onunla bitə bilər ki, o tamamilə başqa bir problemi həll etməyə “öyrədilə” bilər.

Həmçinin süni intellekt hələlik həqiqəti fantastikadan ayırmaq, dezinformasiya ilə mübarizə aparmaq və sosial şəbəkələrdə emosiyaların tanınması qabiliyyətinə malik deyil. Süni intellekt yaradıcılıqdan məhrumdur – o yalnız insanların üslubunu təqlid etməyə qadirdir, lakin özünkünü yaratmağa yox. Bir çox hallarda insanlar süni intellektə çox da inanmırlar, bu isə onun tətbiqini çox yavaşdır. Müxtəlif xəstəliklərin müalicəsi variantlarını tövsiyyə etmə qabiliyyətinə malik layihələr mövcuddur və bəzi hallarda alqoritmin tövsiyyələri həkimlərin tövsiyyələri ilə üst-üstə düşür. Lakin həkimlər hələ həyat və ölüm məsələlərinin həllinin maşına həvalə edilməsinə hazır deyillər. Süni intellekt tərəfindən buraxılan potensial səhvə görə məsuliyyət çox ciddi məsələ olaraq qalır [1].

Daha bir problem neyron şəbəkəsinin öz-özünə öyrədilməsidir və bu sona qədər təyin olunmayan prosesdir. Əlbəttə ki, mütəxəssislər neyroşəbəkə veilənlərinin emalı prinsiplərini ümumi mənada təsəvvür edirlər, lakin mürəkkəb sistemlərdə çıxışda bəzən tamamilə gözlənilməz olan nəticələri gözləmək olar.

Müəyyən problemlərə baxmayaraq süni intellektin hər halda böyük sayda imkanları mövcuddur. Hal-hazırda süni intellekt alimlərə zəlzələni proqnozlaşdırmağa kömək edir, bizim evləri yığışdırır, avtomobilin sığortasının qiymətini hesablayır və dərmanların testləşdirilməsində istifadə olunur – bütün bunlar onun imkanlarının yalnız bir hissəsidir. Ümumilikdə Sİ məhsuldarlığı yaxşılaşdırır və insanlara daha çox sərbəst vaxt verir. Sİ sayəsində aydın olur ki, insan təcrübəsi nə qədər mühümdür. Texnologiya avtomatik məsələlərlə möhtəşəm bacarır, lakin o empatiya, mülahizə, münasibət və ümumi həyat təcrübəsində insanı üstəliyə bilməz. Məhz buna görə də Sİ bizi tam işdən məhrum edə bilməz. Əksinə o daha çox karyera imkanları yaradır. Nə qədər ki çox maşın və Sİ qurğuları meydana gələcəklər, bir o qədər çox onlara kömək edəcək insanlar tələb olunacaqlar. İşin hər bir mərhələsində süni intellektə insanın köməyi lazım olacaq – o daimi insan diqqəti olmadan normal fəaliyyət göstərə bilməz.

Texnologiyanın inkişafı yavaş və öz çətinlikləri ilə baş verir, lakin ümumilikdə müsbət tərəflər mənfi tərəfləri aşır. Onun işlənilməsinə yanaşmanın dəyişməsi və ya Sİ-ni yenidən düşünmək onun inkişafını sürətləndirə bilər. Əgər süni intellekti insan ilə birləşdirsək, o zaman inanılmaz nəticə alınar. Sİ bizi monoton məsələlərdən azad edir və daha çox kreativliyə və yeni həllər axtarmağa diqqəti yönəltməyə sövq edir [2].

**Süni intellektin etik problemləri.** Süni intellektə etika həlli tələb olunan ən mühüm məsələlərdən biridir. Süni intellektin etikası bu sahədə xüsusi etik riskləri olan çoxlu mövzuları əhatə edir [3]. Bir çox sahələr, həmçinin xüsusi mühüm etik nəticələrə malik ola bilərlər, məsələn, səhiyyə, təhsil, cinayət ədaləti və ya ordu.

Süni intellektin etik problemlərinə alqoritmik qərəzlər, ədalətlik, avtomatlaşdırılmış qərarların qəbulu, hesabatlılıq, məxfilik və tənzimləmə daxildir. Süni intellektə etika məxfiliyin pozulması, qərəzliliyin saxlanılması və sosial təsir də daxil olmaqla müxtəlif məsələlərin müzakirəsini əhatə edir. Süni intellektin işlənilməsi və tətbiqi prosesi onun qərarlarının və hərəkətlərinin etik nəticələri ilə bağlı suallar doğurur. Bundan başqa, ədalətli nəticələrə nail olmaq üçün etik prinsiplərin daha çox tətbiqini tələb edən səhiyyə və cinayət mühakiməsi kimi həssas sahələrdə süni intellekti tətbiq edərkən daha məqsəduyğun yanaşmadan istifadə etmək mühümdür.

Süni intellektə qərəzlilik ədalətsiz rəftara və ayrı-seçkiliyə gətirib çıxara bilər ki, bu da hüquq-mühafizə orqanları, işə qəbul prosedurları, kreditlərin təsdiqlənməsi və s. kimi kritik sahələrdə problem yarada bilər. Qərəzliyi azaltmaq üçün işə götürmə və digər oxşar prosedurlarda Sİ-dən necə istifadə etməyi öyrənmək mühümdür. Süni intellektin qərəzliliyinin “yumşaldılması”, qərəzliliyin minimuma endirilməsi və ədalətliyin təmin edilməsi verilənlərin seçilməsinə, ilkin



emal üsullarına və alqoritmərin işlənməsinə düşünlümüş yanaşmanı tələb edir. Sİ-nin qərəzlilik problemlərinin həlli özünə verilənlərin diqqətli seçimini və alqoritmlərin işlənməsini daxil edir.

Süni intellekt sistemləri həssas məlumatları ifşa edə biləcəyi üçün uzunmüddətli perspektivdə verilənlərin məxfiliyini və təhlükəsizliyini qorumaq məqsədilə kritik ola biləcək böyük həcmdə məlumatlara etibar edir. Sızmaların, pozuntuların və sui-istifadə hallarının qarşısını almaq üçün məlumatların təhlükəsizliyi, əlçatanlığı və bütövlüyü təmin edilməlidir. Əlavə olaraq, məlumatların məxfiliyinin və verilənlərin təhlükəsizliyinin təmin edilməsi üçün güclü şifrələmə üsullarını tətbiq etmək, məlumatları anonimləşdirmək və ciddi məlumatların qorunması qaydalarına riayət etmək vacibdir. Bu, həm də etibarın itirilməsinin və məlumatların pozulmasının qarşısını alır. Digər tərəfdən verilənlərin etikası məhz zamanın tələbidir. Bundan başqa diferensial məxfilik və federasiyalı öyrənmə kimi məxfiliyi qoruyan yanaşmalardan istifadə məxfilik risklərini minimuma endirmək və məlumatların faydalılığını qorumaq üçün mühüm əhəmiyyətə malikdir. Verilənlərin emalının şəffaf prosesləri və verilənlərin emalının etik protokolları vasitəsilə istifadəçilər arasında etimadın yaradılması süni intellekt sistemlərində istifadəçi inamı və verilənlərin məsuliyyətlə idarə olunması üçün mühüm əhəmiyyətə malikdir.

Süni intellektə ayrı-seçkiliyə misal olaraq, sistemin irqinə, cinsinə və ya digər amillərə görə müəyyən fərdlərə və ya qruplara qarşı qərəzli və ədalətsiz davranmanı göstərmək olar. Süni intellekt sistemləri bilmədən öz təlim dəstlərində sosial qərəzləri gücləndirə və ya şiddətləndirə bilsə də, son nəticədə ayrı-seçkilik doğuran nəticələrə gətirib çıxara bilər. Məsələn, işə götürmə və borc vermə proseslərində istifadə olunan qərəzli alqoritmlər mövcud bərabərsizlikləri gücləndirə bilər.

Süni intellekt proqramının uğursuzluğu kritik risklərə, o cümlədən səhv nəticələrə, sistem nasazlıqlarına və ya kibərhücumlara gətirib çıxarır. Bu cür riskləri aradan qaldırmaq üçün proqram təminatının həyat dövrünün hər bir mərhələsində sınaq və keyfiyyət təminatı təcrübələrinə ciddi şəkildə əməl edilməlidir.

Hər bir sahədə süni intellektdən daha aktual olan etik problemlər (göstəricilər) yoxdur. Bu ümumi təyinatlı texnologiyalar bizim həyat tərzimizi dəyişir. Süni intellektin inkişafı və tətbiqi zamanı ciddi müzakirə və tənzimləmə tələb edən müxtəlif etik məsələlər ortaya çıxır. Başqa sözlə süni intellektin həyatımızda olması mənfi nəticələrə və etik prinsiplərin pozulmasına səbəb ola bilər.

Süni intellektə etik məsələlərə misal olaraq verilənlər və məxfiliyə, ədalətliyə, izah edilə bilənliyə, etibarlılığa, şəffaflığa, ekoloji davamlılığa, inklüzivliyə, əxlaqi agentliyə, dəyərlərin uyğunlaşdırılmasına, hesabatlılığa, güvən və texnologiyadan sui-istifadəyə görə məsuliyyətdir.

Əsas məsələlərdən biri də süni intellekt alqoritmlərinin şəffaflığı və izahlılığı məsələsidir. Süni intellekt mürəkkəb alqoritmlər və neyron şəbəkələri əsasında qərarlar qəbul edərkən, bu qərarların necə qəbul edildiyini və nəticələrə hansı amillərin təsir etdiyini anlamaq bizim üçün vacibdir.

Texnologiya tibb və hüquq kimi kritik sahələrə yayıldıqca və onun həyata keçirilməsinə dərin texniki biliyi olmayan daha çox insan cəlb olunduqca maşın öyrənməsində qərəzlilik məsələsi daha da aktuallaşacaq [4]. Bununla belə, həm fəlsəfi, həm də hüquqi müstəvidə ayrı-seçkilik anlayışının qeyri-müəyyənliyinə görə mövcud Sİ-nin cari ədalətlik mənzərəsində məhdudiyyətlər də mövcuddur [5]. Ədliyyə sistemində süni intellektin qaradəriliyə qarşı qərəzli olduğu, qaradərili məhkəmə iştirakçılarının ağdərili iştirakçılara nisbətən daha yüksək nisbətdə yüksək risk kimi qeyd edildiyi göstərilmişdir. Süni intellekt tez-tez irqi təhqirləri və senzura ehtiyac duyduqlarını müəyyən etməkdə çətinlik çəkir. Sİ müəyyən sözlərin nə vaxt təhqir kimi işlədildiyini və nə vaxt mədəni şəkildə işlədildiyini müəyyən etməkdə çətinlik çəkir [6].

**Sosial problemlər.** Hal-hazırda süni intellekt insanlar, mədəniyyət, cəmiyyət və ətraf mühit üçün dərin təsirləri olan texnologiyaların konvergensiyası dövrünün əsas elementi kimi çıxış edir. Süni intellekt sistemlərinin geniş tətbiqi sosial və mədəni problemlər yaratmışdır. Bu problemlər

mühüm əhəmiyyət kəsb edirlər, belə ki, insanlar hələ intellektin bu növünə öyrəşməmişlər. Nə vaxt yadda qalan sənət əsərləri və ya görkəmli elmi əsərlərlə rastlaşsaq, onların arxasında “şüurlu” intellektin dayandığını düşünürük ki, onun əməyi zəngin daxili aləmi, dünyagörüşü və s. olan insanın özünəməxsus şəxsiyyət faktoru ilə müəyyən edilir. Bu adi empirik qaydanı Sİ əsasında yüksəkfunksional sistemlərin parlaq nəticələrinə tətbiq etməməyimiz faktı ciddi sosial və mədəni problemlər yaradır.

**Tədris prosesində süni intellektin sosial problemləri.** Süni intellektlə bağlı əsas sosial problemlərdən biri işçi qüvvəsinin əvəzlənməsidir. Süni intellekt tərəfindən idarə olunan dəyişiklik sürəti miqyasına görə görünməmiş nəticələrə malikdir və yaxın gələcəkdə o çoxlu sayda işçinin yenidən hazırlanması zərurətini irəli sürəcək, həmçinin təhsil alanların karyera perspektivləri üçün ciddi təsirə malik olacaqdır. Müvafiq olaraq, süni intellekt cəmiyyəti təhsilə və onun sosial roluna yenidən baxmağa sövq edəcək. Rəqəmsal iqtisadiyyatın sürətli inkişafı və süni intellektə əsaslanan tətbiqlərin çoxalması dövründə universitetlərin təklif etdiyi ənənəvi təhsil kifayət olmaya bilər.

Empatiya, yaradıcılıq və uyğunlaşma süni intellektin təkrarlanması üçün olan öyrənmənin kritik elementləridir. Süni intellekt təhsilin müəyyən aspektlərini avtomatlaşdırma və dəyərli dəstək təklif edə bilsə də, müəllimləri tamamilə əvəz edə bilməyəcək.

Süni intellekt sistemləri effektiv olsa da, insan müəllimlərin təklif etdiyi empatiya, anlayış və şəxsi əlaqəni təkrarlama bilməz. İnsan elementlərinin bu çatışmazlığı tələbələrin sosial və emosional inkişafına, eləcə də onların öyrənməyə ümumi cəlb edilməsinə və motivasiyasına təsir göstərə bilər.

**Hansı peşələri Sİ əvəz edə bilməz?** Bu peşələrə aşağıdakıları göstərmək olar:

- Sİ ilə əvəz edilə bilməyən texniki peşələr – proqram mühəndisləri, ...
- Süni intellektin əvəz edə bilməyəcəyi yaradıcı peşələr – yazıçı, şair, ...
- Süni intellektin əvəz edə bilməyəcəyi tibb peşələr – fizioterapevtlər, ...
- Süni intellektin əvəz edə bilməyəcəyi əsas peşələr – şəxsi ünsiyyətilə bağlı rollar, müştərilərin xidməti.

İstənilən texnologiyanın tətbiqi insanların həyatını yenidən qurur və psixoloji uyğunlaşmanı tələb edir, lakin bu baxımdan süni intellekt xüsusi yer tutur. Hətta insanların da həll etdiyi problemləri, sadəcə olaraq, yaxşı və ya pis həll edən qurğular cəmiyyətdəki müxtəlif proseslərə təsir göstərə bilərlər. Daha ümumi planda indiyə qədər insanların əlində olan həyat sferaları üzərində nəzarətin maşınlara ötürülməsi problemi meydana çıxır. İnsanı idrak fəaliyyətində əvəz edən süni intellekt, əlbəttə ki, çoxsaylı xoşagəlməz və yorucu vəzifələri aradan qaldırmağa və əmək məhsuldarlığını kəskin şəkildə artırmağa qadirdir, daha dəqiq desək bəşəriyyətin xeyrinə avtomatik qurğular tərəfindən istehsal olunan demək olar ki, qeyri-məhdud əmək həcmi təmin etmək. Bununla belə, bu, həm də sizi həzz almaqdan məhrum edir, üstəlik, baş qəhrəmanın, öz həyatının mövzusunun funksiyalarına təsir göstərməklə təhdid edir, yəni. insan psixikasının məna yaradan özəyini. Nəhayət, bu, məsuliyyəti şüurlu olmayan və nəticədə hüquqi və psixiatrik mənada sağlam olmayan bir cihaza köçürmək deməkdir. Bütün bunlar sosial-humanitar elmlərin qarşısında insanın həyatdakı mənasını dərk etməsinə kömək edəcək bəzi idrak funksiyalarını süni cihazlara köçürmək üçün bir konsepsiya hazırlamaq vəzifəsini qoyur.

Narahatlığın digər təbəqəsi isə süni intellektin insanları və sosial prosesləri təhlil edə bilməsi, üstəlik onlara fəal təsir göstərməsi ilə bağlıdır. Beləliklə, süni intellekt texnologiyaları artıq bu gün insanın xüsusiyyətlərini müxtəlif təzahürlər əsasında qiymətləndirmək və müxtəlif situasiyalarda davranışı proqnozlaşdırmaq qabiliyyətinə malikdir. Lakin bu texnologiyalar həm də təsir vasitələri yaratmağa qadirdirlər: məsələn, yeni obyektlərin generasiyası – mətnlər, şəkillər, əvvəlcədən müəyyən edilmiş qiymətlərə malik - videolar məsələn, məlum obyektlərin və insanların yeni şəkillərini və ya onların video şəkillərini yaratmaq.

Süni intellektin sosial ədalətə təsir göstərməsinin əsas yollarından biri qərəzli qərarların qəbul edilməsidir. Süni intellekt sistemləri verilənlər üzərində öyrədilmiş alqoritmlərə güvənir və bu məlumatlar qərəzlidirsə, yaranan sistem bu qərəzi davam etdirə bilər. Məsələn, göstərilmişdir ki, uzun tanınması texnologiyası daha tünd dəri tonları olan insanlar üçün səhvlərin daha yüksək səviyyəsinə malikdir və bu həmin sistemin düzgün təsnifat aparmadığı insanlar üçün ciddi olduğu göstərilmişdir ki, bu da həmin sistemlər tərəfindən səhv müəyyən edilən insanlar üçün ciddi nəticələrə gətirə bilər. Analoji olaraq, proqnozlaşdırıcı polis alqoritmləri irqi profiləşdirməni əbədləşdirməyə və azlıqların icmalarını hədəfə almağa görə, ciddi tənqiddə məruz qalmışlar. Bu nümunələr süni intellektin sosial ədalət təsirlərinə diqqət yetirməyin vacibliyini və daha inklüziv və ədalətli sistemlərin işlənilməsinin vacibliyini vurğulayır.

**Sosial şəbəkələrdə Sİ.** Süni intellekt, texnologiya və elmdən səhiyyə və biznes marketinginə qədər müxtəlif sahələrdə mühüm rol oynayır. Süni intellekt, bizim bildiyimiz kimi sosial şəbəkələr mənzərəsini formalaşdırır - marketoloqlar bütün marketing kampaniyalarını yarada, həmçinin sosial imzalar və ya reklam şüarları üçün mətn hazırlaya bilərlər. Reklamdan tutmuş məzmunun istehlakına qədər istifadəçilər sosial şəbəkələrin platformalarında süni intellektin hər yerdə olmasından xəbərsiz qalırlar, belə ki, süni intellekti pərdə arxasında işləyir [7].

Sosial şəbəkələrdə süni intellektdən istifadə, şübhəsiz ki, istifadəçi təcrübəsini yaxşılaşdırmaqda, daha ağıllı marketing qərarları qəbul etmədə bizneslərə kömək etmək üçün bir çox üstünlüklər təqdim etsə də, bu, istifadəçilərin şəxsi məlumatları ilə bağlı müəyyən problemlər yaradır və texnologiyadan istifadə edənlərdən müəyyən dərəcədə özünü məhdudlaşdırmanı və məsuliyyəti tələb edir.

Süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının yaranması ilə sosial şəbəkələr bizə heç bir insan və ya bir qrup insan üçün heç vaxt əlçatan olmayacaq ideyalar verir. Bazarda sosial medianın idarə edilməsinin, məzmunun yaradılmasının, analizin, reklamın və s.-nin idarə edilməsində süni intellektin çox saylı alətləri mövcuddur. Süni intellekt sosial şəbəkələrdə çox vaxt aparan və monoton vəzifələri öz üzərinə götürərək komandaların diqqətini hər hansı bir məsələ üzərində cəmləmək üçün onları azad edir. Daha sonra, bu vaxt müştərilərlə üzvi şəkildə əlaqə saxlamaq, multimedia kampaniyaları planlaşdırmaq və ya daha böyük layihələr üzərində işləmək üçün istifadə edilə bilər [8].

Hər bir texnologiyada olduğu kimi, sosial mediada süni intellektdən istifadənin mənfi cəhətləri var. Bunların bəziləri fərdlərin və şirkətlərin bu güclü vasitələrdən necə istifadə etməsi ilə bağlıdır. Digərləri süni intellekt texnologiyasının özünə xasdır. Sosial şəbəkələrdə süni intellektdən istifadənin bəzi mənfi cəhətlərini sadalayaq:

- Yalan məlumatların yayılması. Bu, ondan irəli gəlir ki, süni intellekt çox tez məzmun yaradır və faktlardan, statistikadan və digər verilənlərdən onların mötəbərliyini yoxlamadan istifadə edir. Sosial şəbəkələrdə süni intellektdən istifadə nəticəsində yaranan dərin saxtakarlıqların sayı artır ki, bu da mənfi sosial və siyasi nəticələrə səbəb ola bilər.
- Plagiatın sayının artması. Bu onunla bağlıdır ki, süni intellekt internetdə məzmun yaratmaq üçün lazım olan informasiyanı tapır və sonra onu dəyişdirmədən və mənbələrə istinad etmədən tərtib edir.
- Plagiatın sayının artması. Bu onunla bağlıdır ki, süni intellekt internetdə məzmun yaratmaq üçün lazım olan informasiyanı tapır və sonra onu dəyişdirmədən və mənbələrə istinad etmədən tərtib edir.
- Sanksiyaların səhv tətbiqi. İcma qaydalarını pozmağa görə səhv cəzanın nəticəsi profillərin və ya yazıların blokdan çıxarılması üçün uzun müraciət prosesi ola bilər.

Süni intellektlə bağlı riskləri azaltmaq üçün istifadəçilər, xüsusən də korporativlər sosial şəbəkələrdə bu texnologiyanın imkanlarından təhlükəsiz istifadə etməyi öyrənməlidirlər. Bu, onlara

öz müştəriləri və bütövlükdə cəmiyyət qarşısında məsuliyyət daşımaqla yanaşı, sosial mediada süni intellektdən istifadədə oblastında trenddə qalmağa imkan verəcək. Süni intellektlə bağlı riskləri azaltmaq üçün istifadəçilər, xüsusən də korporativlər sosial şəbəkələrdə bu texnologiyanın imkanlarından təhlükəsiz istifadə etməyi öyrənməlidirlər. Bu, onlara öz müştəriləri və bütövlükdə cəmiyyət qarşısında məsuliyyət daşımaqla yanaşı, sosial mediada süni intellektdən istifadə oblastında trenddə qalmağa imkan verəcək.

**Nəticə.** Müəyyən problemlərə baxmayaraq süni intellektin hər halda böyük sayda imkanları mövcuddur. Hal-hazırda süni intellekt alimlərə zəlzələni proqnozlaşdırmağa kömək edir, bizim evləri yığışdırır, avtomobilin sığortasının qiymətini hesablayır və dərmanların testləşdirilməsində istifadə olunur – bütün bunlar onun imkanlarının yalnız bir hissəsidir. Ümumilikdə Sİ məhsuldarlığı yaxşılaşdırır və insanlara daha çox sərbəst vaxt verir. Sİ sayəsində aydın olur ki, insan təcrübəsi nə qədər mühümdür. Texnologiya avtomatik məsələlərlə möhtəşəm bacarır, lakin o empatiya, mülahizə, münasibət və ümumi həyat təcrübəsində insanı üstəliyə bilməz. Məhz buna görə də Sİ bizi tam işdən mərhum edə bilməz. Əksinə o daha çox karyera imkanları yaradır. Nə qədər ki çox maşın və Sİ qurğuları meydana gələcəklər, bir o qədər çox onlara kömək edəcək insanlar tələb olunacaqlar. İşin hər bir mərhələsində süni intellektə insanın köməyi lazım olacaq – o daimi insan diqqəti olmadan normal fəaliyyət göstərə bilməz.

Texnologiyanın inkişafı yavaş və öz çətinlikləri ilə baş verir, lakin ümumilikdə müsbət tərəflər mənfi tərəfləri aşır. Onun işlənilməsinə yanaşmanın dəyişməsi və ya Sİ-ni yenidən düşünmək onun inkişafını sürətləndirə bilər. Əgər süni intellekti insan ilə birləşdirsək, o zaman inanılmaz nəticə alınar. Sİ bizi monoton məsələlərdən azad edir və daha çox kreativliyə və yeni həllər axtarmağa diqqəti yönəltməyə sövq edir.

### Ədəbiyyat

1. Пять проблем, которые пока не может решить искусственный интеллект.  
<https://rb.ru/opinion/problemny-ii/>
2. Евсеев, В. И. (2023). Искусственный интеллект в современном мире: надежды и опасности создания и использования. Аэрокосмическая техника и технологии, 1(1), 16–34.
3. Hines, Dwight (1980). A Review of Computing Power and the Human Mind: From Judgment to Calculation. Journal of Mind and Behavior, 1(1): 123–126.
4. Knight W. Google's AI chief says we should forget about Elon Musk's killer robots and worry instead about bias in AI systems. MIT Technology Review
5. Buyl, M., & De Bie, T. (2022). Inherent limitations of AI fairness. Communications of the ACM. Advance online publication.  
<https://doi.org/10.1145/3624700>
6. Spindler, G. (2023), "Different approaches to the liability of artificial intelligence – pros and cons", AI Liability, Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, pp. 41–96,  
<https://doi.org/10.5771/9783748942030-41>
7. <https://icuc.social/resources/blog/ai-in-social-media/>
8. <https://www.unite.ai/ru/10-best-ai-tools-for-social-media/>

## THOUGHTS ON THE PROBLEMS AND SOLUTIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE MODERN WORLD

Ismayilov I.M

**Abstract.** Currently, artificial intelligence (AI) systems in the world belong to those systems that penetrate practically all other areas of the development of modern information technologies

and create revolutionary changes in them. Naturally, the use of AI in education, healthcare, transport, economy and many other areas provides unprecedented benefits, but at the same time it creates certain risks and dangers that cannot be ignored when developing an intellectual property development strategy. Excessive reliance on AI technologies could lead to a loss of human influence and a lack of human activity in some parts of society. Despite the AI has some incredible advantages, its shortcomings, particularly in relation to cybersecurity, social and ethical challenges, cannot be ignored. This suggests that a balanced and integrated approach to technological progress and ethics will be required to maximize the benefits of AI while minimizing its risks. Therefore, it is important to continue research on AI to understand its potential and threats and to develop strategies to minimize risks. Taking into account the above, the presented article examines the application of AI in various fields in modern times and its effectiveness, the problems encountered depending on the field of application, as well as the possible threats of AI and ways to manage its risks. Here, the main focus is on the problems created by AI in areas where it is applied, such as education, healthcare, economy, social networks, and cybersecurity, and various thoughts are presented on ways to overcome those problems.

**Keywords.** artificial intelligence, intelligent systems, artificial intelligence algorithms, machine learning, ethical issues of artificial intelligence, social issues of artificial intelligence



## THE IMPACT OF STUDENT-CENTERED DIGITAL FEEDBACK SYSTEMS ON TEACHING QUALITY: INTEGRATING ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO HIGHER EDUCATION IN AZERBAIJAN



**Garayeva P.V.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
p.garayeva@naa.edu.az

**Abstract.** *The rapid evolution of educational technology has fundamentally transformed traditional pedagogical approaches in higher education institutions worldwide. This study examines the implementation and effectiveness of student-centered digital feedback systems enhanced with artificial intelligence capabilities within Azerbaijan's higher education landscape. Through a comprehensive analysis of three major universities in Baku, we investigated how AI-driven feedback mechanisms influence teaching quality, student engagement, and learning outcomes. The research employed a mixed-methods approach, combining quantitative data from 342 students and qualitative insights from 28 faculty members over an academic semester. Results demonstrate that institutions utilizing AI-enhanced feedback systems showed a 23% improvement in student satisfaction scores and a 31% increase in timely assignment completion rates compared to traditional feedback methods. Faculty participants reported enhanced ability to provide personalized guidance while managing larger class sizes more effectively. The study reveals significant correlations between AI-assisted feedback delivery and improved academic performance, particularly in technical disciplines. However, challenges including digital literacy gaps, infrastructure limitations, and cultural adaptation barriers were identified. These findings suggest that strategic integration of AI-powered feedback systems can substantially enhance educational quality in Azerbaijan's higher education sector while addressing specific regional challenges and opportunities.*

**Keywords:** *artificial intelligence, digital feedback, student-centered learning, higher education, teaching quality, educational technology, Azerbaijan*

**Introduction.** The transformation of higher education through digital technologies has become increasingly crucial for developing nations seeking to enhance their educational competitiveness on the global stage. Azerbaijan, as a country undergoing rapid modernization, faces unique challenges in adapting international educational innovations to its cultural and institutional contexts. The traditional teacher-centered approach prevalent in post-Soviet educational systems has gradually shifted toward more interactive, student-focused methodologies, particularly with the integration of digital tools and artificial intelligence [1].

Recent developments in educational technology have demonstrated that personalized feedback systems can significantly impact student learning outcomes and teaching effectiveness. However, the implementation of these systems in Azerbaijan's higher education sector remains relatively unexplored territory. The country's strategic emphasis on technological advancement, coupled with substantial investments in educational infrastructure, creates an opportune environment for examining how AI-enhanced feedback systems can address longstanding pedagogical challenges. [2]

Previous research in Western educational contexts has established strong correlations between timely, personalized feedback and improved student performance. Studies conducted by Johnson

and Martinez (2022) in European universities demonstrated that AI-assisted feedback systems reduced instructor workload by 40% while maintaining feedback quality [3]. Similarly, research by Chen et al. (2021) in Asian educational settings revealed that students receiving AI-enhanced feedback showed 28% better retention rates compared to traditional methods [3].

However, the direct application of these findings to Azerbaijan's educational environment requires careful consideration of local factors including language preferences, technological infrastructure, cultural attitudes toward digital learning, and existing institutional frameworks. The gap between international research findings and regional implementation strategies necessitates localized studies that can inform policy decisions and institutional practices.

This research addresses the critical need for evidence-based approaches to educational technology integration in Azerbaijan's higher education sector [4]. By focusing specifically on student-centered digital feedback systems enhanced with artificial intelligence, this study aims to provide actionable insights for educators, administrators, and policymakers seeking to improve teaching quality while respecting cultural and institutional contexts.

**Methods.** This study employed a comprehensive mixed-methods research design to examine the impact of AI-enhanced digital feedback systems on teaching quality across three prominent higher education institutions in Baku: Azerbaijan State University, Baku State University, and the National Aviation Academy. The research was conducted over a full academic semester (September 2024 to January 2025) to ensure sufficient data collection and analysis [3].

The quantitative component involved 342 undergraduate students across various disciplines including engineering, business administration, computer science, and humanities. Participants were randomly assigned to either experimental groups using AI-enhanced feedback systems or control groups receiving traditional feedback methods. The experimental group consisted of 186 students, while the control group included 156 students. Demographic data revealed that 58% of participants were female, with ages ranging from 18 to 24 years. [5]

Qualitative data collection involved semi-structured interviews with 28 faculty members who had experience implementing digital feedback systems in their courses. These interviews explored educators' perceptions of AI integration, challenges faced during implementation, and observed changes in student engagement and learning outcomes. Additionally, focus group discussions were conducted with 24 students from the experimental group to gather detailed insights about their experiences with AI-enhanced feedback.

The AI-enhanced feedback system utilized natural language processing algorithms to analyze student submissions and provide immediate, personalized responses. The system was programmed to identify common error patterns, suggest specific improvements, and adapt feedback complexity based on individual student proficiency levels. Integration with the university's existing learning management system ensured seamless user experience while maintaining data security protocols [2].

Data collection instruments included pre- and post-implementation surveys measuring student satisfaction, engagement levels, and perceived learning effectiveness. Academic performance was assessed through comparative analysis of assignment grades, completion rates, and final course evaluations. Faculty productivity metrics were tracked through time-spent-on-feedback logs and workload assessment questionnaires. [5]

Statistical analysis employed SPSS software for quantitative data processing, utilizing t-tests for comparing group means and regression analysis for identifying correlational relationships. Qualitative data underwent thematic analysis using NVivo software to identify recurring patterns and themes in participant responses. Inter-rater reliability was established through independent coding by two researchers, achieving a Cohen's kappa coefficient of 0.87. [1]



Ethical considerations were addressed through informed consent procedures, ensuring participant anonymity, and obtaining institutional review board approval from all participating universities. Data storage and processing adhered to Azerbaijan's data protection regulations and international research ethics standards. [6]

**Results and Discussion.** The implementation of AI-enhanced digital feedback systems yielded significant improvements across multiple educational metrics. Quantitative analysis revealed that students in the experimental group demonstrated substantially higher satisfaction levels compared to their counterparts receiving traditional feedback. The mean satisfaction score for AI-enhanced feedback recipients was 4.32 (SD = 0.74) on a five-point Likert scale, compared to 3.51 (SD = 0.89) for the control group, representing a statistically significant difference ( $t = 8.42$ ,  $p < 0.001$ ).

Academic performance indicators showed marked improvements among students utilizing AI-enhanced systems. Assignment completion rates increased from 67% in the control group to 88% in the experimental group, while average assignment grades improved by 12.3 percentage points. Notably, students who initially demonstrated lower academic performance showed the most substantial gains, suggesting that AI-enhanced feedback systems may help reduce achievement gaps within diverse student populations [5].

Time efficiency emerged as a critical factor in faculty adoption of AI-enhanced systems. Instructors reported spending an average of 3.2 hours per week providing feedback to classes of 30 students when using AI assistance, compared to 7.8 hours for traditional methods. This efficiency gain allowed educators to allocate more time to curriculum development, individualized student consultations, and research activities [5].

Qualitative analysis of faculty interviews revealed several thematic categories regarding AI integration experiences. The most frequently mentioned benefit was the system's ability to provide consistent, objective feedback regardless of instructor fatigue or mood variations. One computer science professor noted that "the AI system catches technical errors I might miss during late-night grading sessions, and students receive feedback within minutes rather than days."

However, implementation challenges were also identified. Approximately 34% of faculty participants expressed concerns about over-reliance on technology, fearing that reduced human interaction might negatively impact the mentoring aspects of education. Cultural adaptation issues were particularly evident among older faculty members, with 28% reporting discomfort with AI-mediated teaching processes [4].

Student perspectives gathered through focus groups revealed generally positive attitudes toward AI-enhanced feedback, with particular appreciation for immediate response times and consistent availability. However, some students expressed preferences for human feedback on creative assignments, suggesting that hybrid approaches might optimize the benefits of both AI and human input.

The study identified several contextual factors specific to Azerbaijan's educational environment that influenced implementation success. Language processing capabilities were crucial, as the AI system's effectiveness decreased when students submitted work in Azerbaijani rather than English. Additionally, variations in technological infrastructure across different university campuses affected system reliability and user experience [1].

Comparative analysis with similar studies conducted in other educational contexts reveals both convergent and divergent findings. While the overall positive impact on student satisfaction aligns with international research, the magnitude of improvement observed in Azerbaijan exceeded expectations, possibly due to the significant contrast with previous traditional feedback methods [6].

The integration of AI-enhanced feedback systems also demonstrated unexpected benefits for institutional assessment processes. Standardized data collection enabled more comprehensive

evaluation of teaching effectiveness across different courses and departments, providing valuable insights for curriculum improvement and faculty development programs. [4]

**Conclusions.** The research findings demonstrate that student-centered digital feedback systems enhanced with artificial intelligence can significantly improve teaching quality in Azerbaijan's higher education sector. The substantial increases in student satisfaction, academic performance, and faculty efficiency provide compelling evidence for broader adoption of these technologies within the country's educational institutions. [5]

Several key recommendations emerge from this study. First, universities should prioritize hybrid implementation approaches that combine AI efficiency with human oversight, particularly for complex or creative assignments requiring nuanced evaluation. Second, comprehensive faculty training programs are essential for successful technology integration, addressing both technical skills and pedagogical adaptation strategies.

Infrastructure development remains crucial for successful implementation across all institutional contexts. Universities must invest in reliable internet connectivity, adequate hardware resources, and technical support systems to ensure consistent user experiences. Additionally, the development of multilingual AI capabilities would enhance accessibility for students and faculty who prefer working in Azerbaijani. [7]

Future research should explore long-term impacts of AI-enhanced feedback systems on learning outcomes and career preparation. Longitudinal studies tracking student performance beyond individual courses would provide valuable insights into the sustained benefits of these technological interventions. Additionally, investigation of optimal AI-human feedback ratios could inform more refined implementation strategies. [6]

The successful integration of AI-enhanced feedback systems in Azerbaijan's higher education sector represents a significant step toward educational modernization while maintaining cultural relevance. These findings suggest that developing nations can effectively leverage advanced educational technologies to enhance teaching quality and student outcomes when implementation strategies account for local contexts and constraints. [6]

Policy implications include the need for national educational technology standards, funding mechanisms for institutional technology upgrades, and regulatory frameworks ensuring ethical AI use in educational settings. The positive outcomes observed in this study support continued investment in educational technology initiatives as part of Azerbaijan's broader modernization objectives. [7]

## References

1. Johnson, M. K., & Martinez, L. R. (2022). *Artificial intelligence in European higher education: A comparative analysis of feedback systems effectiveness*. Educational Technology Research, 45(3), 234–251.
2. Chen, W. L., Kim, S. H., & Park, J. Y. (2021). *Digital feedback mechanisms in Asian universities: Student engagement and academic performance correlations*. International Journal of Educational Innovation, 28(4), 412–429.
3. Əliyev, R. S., & Məmmədova, G. A. (2023). *Educational technology adoption in post-Soviet higher education systems*. Central Asian Educational Review, 19(2), 156–173.
4. Thompson, A. B., & Williams, C. D. (2020). *Student-centered learning approaches: Theoretical foundations and practical applications*. Academic Publishing House.
5. Hüseynova, N. M., & Qasimov, F. K. (2022). *Higher education reform in Azerbaijan: Challenges and opportunities in the digital age*. Caucasus Educational Journal, 12(1), 78–95.

6. Roberts, K. L., & Anderson, P. J. (2021). *Feedback quality and learning outcomes: A meta-analysis of educational intervention studies*. Educational Psychology Review, 33(2), 287–312.  
<https://doi.org/10.1007/s10648-020-09575-1>
7. Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan. (n.d.). *Azərbaycan SSR Xalq Maarifi Komissarlığı haqqında*.  
<https://www.edu.gov.az/en/page/90/8264>

## **TƏLƏBƏYÖNÜMLÜ RƏQƏMSAL ƏLAQƏ SİSTEMLƏRİNİN TƏDRİS KEYFİYYƏTİNƏ TƏSİRİ: SÜNİ İNTELLEKTİN AZƏRBAYCAN ALİ TƏHSİLİNƏ İNTEQRASIYASI**

Qarayeva P.V.

**Xülasə.** *Təhsil texnologiyalarının sürətli inkişafı dünyada ali təhsil müəssisələrində ənənəvi pedaqoji yanaşmaları əsaslı şəkildə dəyişdirmişdir. Bu tədqiqat Azərbaycan ali təhsil mühitində süni intellektlə təkmilləşdirilmiş tələbə-mərkəzli rəqəmsal geribildirim sistemlərinin tətbiqini və effektivliyini araşdırır. Bakı şəhərində yerləşən üç aparıcı universitetin hərtərəfli təhlili əsasında süni intellektə əsaslanan geribildirim mexanizmlərinin tədrisin keyfiyyətinə, tələbələrin fəallığına və öyrənmə nəticələrinə necə təsir etdiyi öyrənilmişdir. Tədqiqat qarışıq metodologiya əsasında aparılmış, bir semestr ərzində 342 tələbədən kəmiyyət göstəriciləri və 28 müəllimdən keyfiyyət xarakterli məlumatlar toplanmışdır. Nəticələr göstərir ki, süni intellektlə təkmilləşdirilmiş geribildirim sistemlərindən istifadə edən ali təhsil müəssisələrində tələbə məmnuniyyəti göstəriciləri 23%, tapşırıqların vaxtında yerinə yetirilməsi isə 31% artmışdır. Müəllimlər daha böyük qruplarla işləyərkən fərdiləşdirilmiş təlimat vermək imkanlarının artdığını bildiriblər. Tədqiqat göstərir ki, süni intellektin dəstəyi ilə verilən geribildirim tədris nəticələrini, xüsusilə texniki ixtisaslarda, əhəmiyyətli dərəcədə yaxşılaşdırır. Bununla belə, rəqəmsal savadlılıq çatışmazlıqları, infrastruktur məhdudiyyətləri və mədəni uyğunlaşma çətinlikləri kimi problemlər də aşkara çıxarılmışdır. Bu nəticələr göstərir ki, süni intellektə əsaslanan geribildirim sistemlərinin strateji şəkildə integrasiyası Azərbaycanın ali təhsil sektorunda təhsilin keyfiyyətini əhəmiyyətli dərəcədə artırma bilər.*

**Açar sözlər:** *süni intellekt, rəqəmsal geri bildirim, tələbəyönümlü təhsil, ali təhsil, tədris keyfiyyəti, təhsil texnologiyaları, Azərbaycan*

## SÜNİ İNTELLEKT ƏSASLI QIYMƏTLƏNDİRMƏ SİSTEMLƏRİNİN TƏDRİSDƏ EFFEKTİVLİYİNİN ÖLÇÜLMƏSİ



**Osmanlı T.E.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
tosmanli@naa.edu.az



**Rəfizadə Ü.R.**

Azərbaycan Texnologiya Universiteti, Gəncə, Azərbaycan  
u.refizade@atu.edu.az

**Annotasiya.** Müasir təhsil sistemində texnologiyaların, xüsusilə süni intellekt əsaslı qiymətləndirmə və əks-əlaqə mexanizmlərinin integrasiyası öyrənmə prosesinin keyfiyyətini artırmaq üçün yeni imkanlar yaradır. Bu tədqiqat, şəbəkə inzibatçılığı üzrə praktiki bacarıqların inkişafında avtomatlaşdırılmış və ənənəvi qiymətləndirmə üsullarının tələbə fəaliyyətinə təsirini müqayisəli şəkildə təhlil edir. Eksperimentdə 16 tələbə iştirak etmiş, onlar təsadüfi şəkildə iki qrupa bölünərək eyni simulyasiya tapşırığını fərqli qiymətləndirmə metodları ilə yerinə yetirmişlər. Avtomatlaşdırılmış qrupun nəticələri Python skriptləri ilə təhlil edilmiş və statistik göstəricilər əsasında qiymətləndirilmişdir. Əldə olunan nəticələrə əsasən, avtomatlaşdırılmış əks-əlaqə alan tələbələr daha yüksək düzgünlük faizi, daha qısa icra müddəti və daha yüksək motivasiya nümayiş etdirmişlər. T-test nəticələri fərqlərin statistik cəhətdən əhəmiyyətli olduğunu göstərmişdir. Bu yanaşma öyrənmənin effektivliyini və şəffaflığını artırmaqla yanaşı, müəllim yükünü azaldaraq fərdiləşdirilmiş tədris mühitlərinin formalaşmasına töhfə verir. Gələcək tədqiqatlar bu modelin digər fən sahələrində tətbiqi ilə genişləndirilə bilər.

**Açar sözlər:** süni intellekt, avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə, əks-əlaqə sistemləri, tədris effektivliyi, simulyasiya əsaslı təhsil, şəbəkə inzibatçılığı, adaptiv öyrənmə

**Giriş.** Müasir təhsil sistemində texnologiyaların integrasiyası öyrənmə prosesinin keyfiyyətini artırmaq üçün mühüm vasitələrdən birinə çevrilmişdir. Xüsusilə informasiya-kommunikasiya texnologiyaları və süni intellektin inkişafı təhsil sahəsində fərdiləşdirilmiş və adaptiv öyrənmə mühitlərinin yaradılmasına şərait yaradır. Bu yeniliklər tələbələrin bilik və bacarıqlarını real vaxtda qiymətləndirmək və onlara effektiv əks-əlaqə yaratmaq üçün yeni imkanlar təqdim edir.

Şəbəkə inzibatçılığı kimi praktik yönümlü sahələrdə tələbələrin öyrənmə prosesini optimallaşdırmaq məqsədilə həm ənənəvi tədris metodları, həm də simulyasiya əsaslı yanaşmalar geniş istifadə olunur. Simulyasiya mühitləri, xüsusilə Cisco Packet Tracer kimi vasitələr tələbələrə real avadanlıqlar olmadan interaktiv və təhlükəsiz şəkildə praktiki bacarıqlarını inkişaf etdirmək imkanı verir [1]. Digər tərəfdən, ənənəvi tədris üsulları tələbələrə real dünya təcrübəsi qazandırmaqla yanaşı, müəyyən məhdudiyyətlər və resurs tələbləri səbəbindən tətbiqində çətinliklər yaradır.

Bu məqalənin əsas məqsədi, şəbəkə təhsili sahəsində tələbələrin fəaliyyət göstəricilərinin süni intellektlə avtomatlaşdırılmış əks-əlaqə mexanizmləri və qiymətləndirmə alqoritmləri vasitəsilə

intellektual qiymətləndirilməsini təmin etmək və simulyasiya ilə ənənəvi tədris metodlarının effektivliyini müqayisəli şəkildə təhlil etməkdir. Tədqiqat, tələbələrin müxtəlif fəaliyyət göstəricilərini analiz edərək, tədris metodlarının onların bilik və bacarıqlarına təsirini öyrənir və təhsil prosesində daha effektiv yanaşmaların tətbiqi üçün əsaslı tövsiyələr verir.

Məqalədə əvvəlcə mövzu ilə bağlı istifadə olunan metodologiya təqdim olunur. Daha sonra, 16 tələbə üzərində aparılan eksperimentin nəticələri statistik üsullarla təhlil edilərək müzakirə olunur. Son olaraq, tədqiqatın nəticələri ümumiləşdirilərək gələcək tədqiqat istiqamətləri və tədris praktikasına töhfələri haqqında fikirlər bildirilir.

Təhsil sahəsində süni intellektin tətbiqi öyrənmə prosesində yeni yanaşmaların yaranmasına səbəb olmuşdur. Avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə sistemləri və adaptiv əks-əlaqə mexanizmləri tələbələrin zəif və güclü tərəflərini real vaxtda aşkar edərək, fərdi öyrənmə yollarının formalaşmasına imkan verir. Bu isə tələbələrin biliklərinin dərinləşməsinə və praktik bacarıqlarının səmərəli inkişafına gətirib çıxarır.

Simulyasiya əsaslı tədris metodları, xüsusilə virtual laboratoriya mühitləri vasitəsilə, tələbələrə kompleks texniki tapşırıqları risksiz və real vaxtda icra etməyə şərait yaradır. Cisco Packet Tracer kimi simulyasiya vasitələri, tələbələrin şəbəkə konfigurasiyası üzrə praktiki bacarıqlarını inkişaf etdirmək üçün geniş imkanlar təqdim edir və bu sahədə tədris keyfiyyətinin artırılmasında mühüm rol oynayır [2].

Lakin ənənəvi tədris üsulları tələbələrə real avadanlıq üzərində işləmək imkanı verərək yüksək real mühit təqdim etsə də, bu yanaşmanın tətbiqində texniki, maddi və vaxt məhdudiyyətləri kimi çətinliklər mövcuddur. Buna görə də, təhsil prosesində həm ənənəvi, həm də simulyasiya əsaslı metodların sintezi və süni intellektlə avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə sistemlərinin integrasiyası tələbələrin öyrənmə effektivliyini artırmaq üçün zəruridir.

Bu tədqiqat, yuxarıda qeyd olunan yanaşmaları tətbiq edərək, onların şəbəkə tədrisində tələbə performansına təsirini qiymətləndirir və təhsil metodlarının təkmilləşdirilməsi üçün elmi əsaslar təqdim edir.

Bununla yanaşı, tədris prosesində avtomatik və intellektual qiymətləndirmə alqoritmlərinin tətbiqi müəllimlərin iş yükünü azaltmaqla yanaşı, tələbələrə daha tez və obyektiv əks-əlaqə yaratmaq imkanı verir. Bu isə öyrənmə prosesinin şəffaflığını artırır və tələbələrin öz biliklərini daha dəqiq qiymətləndirməsinə kömək edir. Süni intellektlə təchiz olunmuş qiymətləndirmə sistemləri adaptiv öyrənmə mühitləri yarada bilər, yəni tələbənin səviyyəsinə uyğun olaraq çətinlik dərəcəsini tənzimləyə, ona fərdi tövsiyələr və izahlar verə bilər [3].

Bu məqalədə təqdim olunan tədqiqatda, 16 tələbə üzərində aparılan eksperiment çərçivəsində, simulyasiya əsaslı və ənənəvi tədris metodlarının effektivliyi müxtəlif performans göstəriciləri əsasında müqayisəli şəkildə qiymətləndirilir. Məqsəd, süni intellektlə avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə sistemlərinin tədris keyfiyyətinə və tələbə motivasiyasına necə təsir etdiyini aşkar etməkdir.

**Metodologiya.** Bu tədqiqat, şəbəkə təhsili sahəsində simulyasiya əsaslı və ənənəvi tədris metodlarının tələbələrin fəaliyyətinə təsirini qiymətləndirmək məqsədi ilə aparılmışdır. Tədqiqat kəmiyyət yanaşması əsasında, eksperimental üsulla həyata keçirilmişdir. İştirakçılar 16 tələbədən ibarət olmuş və təsadüfi şəkildə iki bərabər qrupa bölünmüşdür.

- 1-ci qrup (n=8): Avtomatlaşdırılmış əks-əlaqə və qiymətləndirmə sistemi ilə tədris almışdır;
- 2-ci qrup (n=8): Ənənəvi müəllim əsaslı qiymətləndirmə ilə tədris almışdır.

Simulyasiya qrupunda tələbələrə verilən tapşırıqların avtomatik qiymətləndirilməsi və real vaxtda interaktiv əks-əlaqə mexanizmi tətbiq edilmiş, hər tapşırığa vaxt limiti təyin olunmuşdur. Ənənəvi qrupda isə qiymətləndirmə və əks-əlaqələr müəllim tərəfindən ənənəvi üsullarla həyata



keçirilmişdir. Bu yanaşma tələbələrin fərqli öyrənmə təcrübələrini və mühitlərinin performans göstəricilərinə təsirini müqayisəli şəkildə öyrənməyə imkan vermişdir.

Hər iki qrup eyni tapşırığı Cisco Packet Tracer simulyasiya mühitində yerinə yetirmişdir. Tapşırıq virtual lokal şəbəkələrin yaradılması və portların təyinatı, alt şəbəkə interfeyslərinin yaradılması, server qurulması və dinamik IP ünvanların paylanması kimi texniki mövzuları əhatə etmişdir.

Avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə qrupunda, tələbələrin təqdim etdiyi .pkt faylları müəllif tərəfindən hazırlanmış Python skriptlər vasitəsilə təhlil edilmişdir. Skript aşağıdakı meyarlara görə nəticələri qiymətləndirmişdir:

- Virtual lokal şəbəkə konfigurasiyasının mövcudluğu və düzgünlüyü;
- Marşrutizator qurğusunun interfeyslərinin konfigurasiyası və aktivliyi;
- Serverlə əlaqəli tənzimləmələrin doğruluğu;
- “Ping” testinin nəticələrinin uğurlu və ya uğursuz olması.

Sistem hər bir tələbə üçün konfigurasiya düzgünlüyünü faizlə hesablamaqla yanaşı, aşkarlanan səhvlərin sayını və tapşırığın icrası üçün tələb olunan vaxtı da qeyd etmişdir. Nəticələr CSV formatına salınaraq Excel və SPSS proqramlarında statistik təhlilə hazır hala gətirilmişdir.

Ənənəvi qiymətləndirmə qrupunda isə tələbələrin tapşırıqları müəllim tərəfindən yoxlama siyahısı əsasında qiymətləndirilmiş və nəticələr əl ilə formalaşdırılmışdır. Yoxlama siyahısı müəyyən edilmiş meyarlar əsasında sistemli və obyektiv şəkildə qiymətləndirmək üçün istifadə olunan cədvəl və ya matrisdir. Başqa sözlə, qiymətləndirmə planı və ya qiymət şkalasıdır, müəllimin və ya sistemin tələbənin işini hansı əsaslarla dəyərləndirəcəyini əvvəlcədən müəyyən və şəffaf şəkildə göstərir. Hər bir konfigurasiya elementi üzrə müəyyən edilmiş ballar cəmlənərək yekun nəticə hesablanmışdır.

Tədqiqatın sonunda hər iki qrupa təlim prosesinə dair sorğu tətbiq olunmuşdur. Bu sorğu 5 ballıq Likert şkalasına əsaslanaraq tələbələrin tədris mühitinə, qiymətləndirmə üsuluna və əks-əlaqə prosesinə dair subyektiv fikirlərini ölçmək məqsədi daşıyırdı.

Toplanmış nəticələr üzərində orta göstəricilər, standart kənarlaşma və t-test kimi statistik metodlar tətbiq olunaraq qiymətləndirmə üsullarının tələbə performansına təsiri müqayisəli şəkildə analiz edilmişdir.

**Toplanmış məlumatlar.** Aparılan eksperiment nəticəsində hər iki qrup üzrə tələbələrin fəaliyyət göstəriciləri toplanmış və statistik təhlil aparılmışdır. Öldə olunan məlumatlar aşağıdakı göstəricilər üzrə müqayisə edilmişdir:

- Tapşırığın düzgünlük faizi (konfigurasiya sətirlərinin dəqiqliyi);
- İcra müddəti (dəqiqə ilə);
- Əks-əlaqəyə əsasən düzəliş sayı;
- Subyektiv qiymətləndirmə: tələbə motivasiyası və razılıq səviyyəsi.

Avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə qrupunda tələbələrin orta düzgünlük faizi 91.25%, ənənəvi qrupda isə 75.75% təşkil etmişdir [4]. Bu fərq t-test vasitəsilə statistik baxımdan əhəmiyyətli hesab olunmuşdur ( $p < 0.05$ ) [5]. Bu nəticə göstərir ki, real vaxtda verilən avtomatik əks-əlaqə tələbələrin səhvləri vaxtında düzəltməsinə və nəticənin keyfiyyətinin yüksəlməsinə səbəb olmuşdur.

Eləcə də avtomatlaşdırılmış qrupda tələbələr tapşırıqları orta hesabla 15 dəqiqəyə, ənənəvi qrup isə 20 dəqiqəyə tamamlamışdır. Bu fərq də statistik olaraq əhəmiyyətlidir və sistemin istiqamətləndirici əks-əlaqə verməsi nəticəsində tələbələrin problemi daha tez başa düşüb həll etməsi ilə əlaqələndirilir.

Cədvəl 1-də avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə qrupu üçün tələbələrin fəaliyyət göstəricilərinin nəticələri göstərilmişdir.



Cədvəl 1  
Tələbə nəticələri (Avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə qrupu)

| Tələbə | Düzgünlük (%) | İcra müddəti (dəq) | Düzəliş sayı | Məmnunluq (100-lük) |
|--------|---------------|--------------------|--------------|---------------------|
| A1     | 90            | 15.0               | 1            | 90                  |
| A2     | 93            | 14.5               | 2            | 95                  |
| A3     | 88            | 15.7               | 1            | 92                  |
| A4     | 95            | 16.2               | 3            | 97                  |
| A5     | 91            | 14.9               | 1            | 98                  |
| A6     | 90            | 15.4               | 2            | 89                  |
| A7     | 89            | 14.3               | 2            | 94                  |
| A8     | 91            | 16.4               | 2            | 99                  |

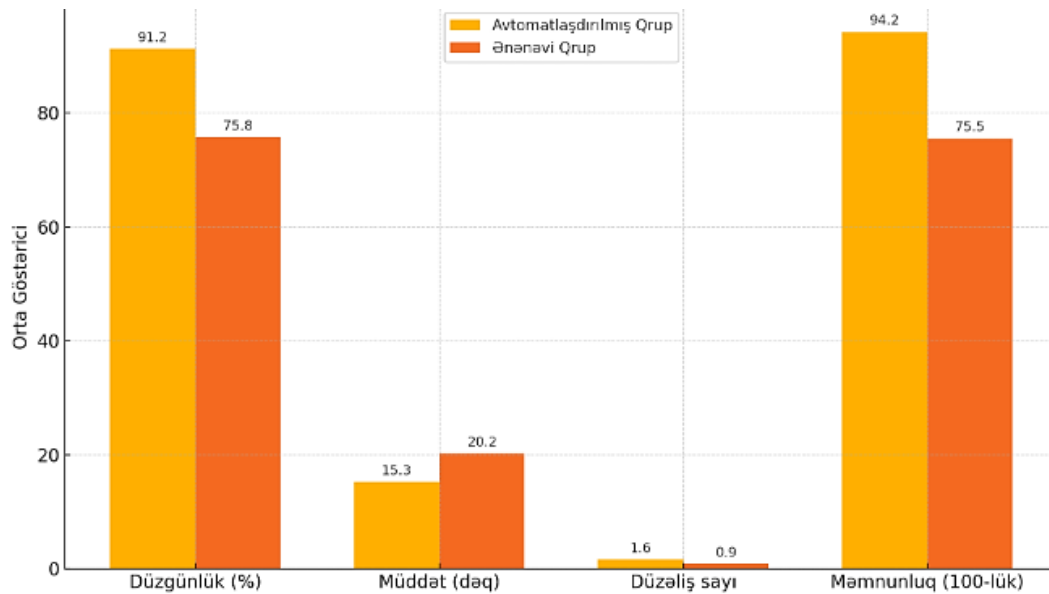
Avtomatlaşdırılmış sistemlə tədris alan tələbələrdə tələbə başına orta hesabla 1.62 düzəliş qeydə almışdır ki, bu da onların problemi dərhal başa düşmə və reaksiya vermə bacarığını göstərir. Ənənəvi qrupda isə düzəliş sayı orta hesabla 0.88 olmuş, lakin bu, gecikmiş və qeyri-real vaxtda verilmiş əks-əlaqə ilə izah olunur.

Cədvəl 2-də ənənəvi qiymətləndirmə qrupu üçün tələbələrin fəaliyyət göstəricilərinin nəticələri göstərilmişdir.

Cədvəl 2  
Tələbə nəticələri (Ənənəvi qiymətləndirmə qrupu)

| Tələbə | Düzgünlük (%) | İcra müddəti (dəq) | Düzəliş sayı | Məmnunluq (100-lük) |
|--------|---------------|--------------------|--------------|---------------------|
| Ə1     | 74            | 20.3               | 0            | 70                  |
| Ə2     | 78            | 19.2               | 1            | 72                  |
| Ə3     | 75            | 21.1               | 1            | 78                  |
| Ə4     | 80            | 20.0               | 2            | 74                  |
| Ə5     | 72            | 19.8               | 1            | 80                  |
| Ə6     | 76            | 21.3               | 0            | 77                  |
| Ə7     | 73            | 20.7               | 2            | 76                  |
| Ə8     | 79            | 19.6               | 1            | 77                  |

Likert şkalası əsasında keçirilmiş sorğunun nəticələrinə əsasən, avtomatlaşdırılmış əks-əlaqə qrupundakı tələbələrin öyrənmə prosesi ilə razılıq səviyyəsi 94.25/100, ənənəvi qrupda isə 75.50/100 olmuşdur. Tələbələr avtomatik sistemin interaktivliyini və səhvləri izah etməsini öyrənməyə müsbət təsir edən amil kimi qeyd etmişlər.



**Şəkil 1.** Tələbələr fəaliyyət göstəricilərinin müqayisəsi

Şəkil 1-də avtomatlaşdırılmış və ənənəvi qrupların tələbə fəaliyyət göstəriciləri müqayisəli şəkildə əks etdirilmişdir. Bu şəkildən də göründüyü kimi, Düzgünlük (%) və Məmnunluq üzrə avtomatlaşdırılmış qrupdan daha yüksək nəticələr əldə edilmişdir. Eləcə də, avtomatlaşdırılmış qrup tapşırıqları həm daha yüksək dəqiqliklə, həm də daha qısa müddətdə yerinə yetirmişdir. Orta icra müddəti bu qrupda daha aşağı olmuşdur (15.26 dəq), bu da real vaxtda təqdim edilən əks-əlaqənin tələbələr problemləri daha tez başa düşüb həll etməsinə imkan yaratdığını göstərir.

Düzəliş sayı baxımından isə avtomatlaşdırılmış qrupda tələbələr orta hesabla daha çox düzəliş etmişdir (1.62 & 0.88). Bu, onların əks-əlaqələrə daha tez reaksiya verərək aktiv şəkildə öz nəticələrini düzəltməyə çalışdıqlarını göstərir — yəni çox düzəliş etmələri zəiflik deyil, interaktiv və reflektiv öyrənmə davranışdır.

**Nəticə.** Bu nəticələr göstərir ki, avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə və əks-əlaqə sistemləri tələbələrin həm fəaliyyətlərinə, həm də öyrənmə motivasiyasına əhəmiyyətli dərəcədə müsbət təsir göstərir [6]. Əks-əlaqə real vaxtda və konkret olduğunda, tələbələr daha sürətli öyrənir, az səhv edir və daha çox həvəs nümayiş etdirirlər.

Avtomatlaşdırılmış əks-əlaqə və qiymətləndirmə sistemləri tələbələrin şəbəkə təlimində fəaliyyətlərini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Avtomatlaşdırılmış sistemlə təlim alan tələbələr daha yüksək düzgünlük faizi göstərmiş (91.25% & 75.75%) və tapşırıqları daha qısa müddətdə tamamlamışlar (15.26 dəq. & 20.24 dəq.). Bu fərqlər statistik cəhətdən əhəmiyyətli olmuş və tədris keyfiyyətinin süni intellekt əsaslı əks-əlaqə ilə gücləndirilməsinin effektivliyini təsdiqləmişdir.

Bundan əlavə, avtomatik əks-əlaqə alan tələbələr daha çox düzəliş etmiş (1.62 & 0.88), bu isə onların interaktiv şəkildə öz səhvlərini dərhal başa düşüb düzəltməyə çalışdıqlarını göstərmişdir. Bu yanaşma, tələbələrin yalnız passiv məlumat qəbul edən deyil, həm də aktiv şəkildə öz bilik və bacarıqlarını formalaşdıran subyektlər kimi yetişməsinə kömək edir.

Sorğu nəticələri də göstərir ki, tələbələrin təlim prosesindən razılıq səviyyəsi avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə qrupunda daha yüksək olmuşdur (94.25 & 75.50). Bu da göstərir ki, texnologiya əsaslı adaptiv öyrənmə yanaşmaları yalnız nəticələri deyil, öyrənmə motivasiyasını və dərslə marağı da artırır.

Bu tədqiqatın nəticələri süni intellekt əsaslı qiymətləndirmə sistemlərinin tədrisə əhəmiyyətli təsirini göstərdiyi üçün, gələcək araşdırmalarda bu yanaşmanın fərqli fən sahələrində (məsələn, proqramlaşdırma, elektronika və riyaziyyat) tətbiqinin effektivliyi araşdırıla bilər [7]. Həmçinin

tələbələrə fərdi öyrənmə tərzlərinə uyğun adaptiv əks-əlaqə modellərinin inkişaf etdirilməsi mühüm tədqiqat mövzusu ola bilər.

Bu tədqiqat göstərir ki, müəllimlər tərəfindən hazırlanmış sadə alqoritmik qiymətləndirmə modulları vasitəsilə təlim prosesinin avtomatlaşdırılması həm müəllim yükünü azaldır, həm də öyrənməni daha şəffaf və interaktiv edir. Bu yanaşma tədrisdə fərdiləşdirilmiş yanaşmaların geniş tətbiqinə şərait yaradır və tədris texnologiyalarının effektiv istifadəsi baxımından əhəmiyyətli bir model kimi çıxış edə bilər.

### Ədəbiyyat

1. Mwansa G., Ngand M.R., & Dasi Z.S. (2024). Enhancing practical skills in computer networking: Evaluating the unique impact of simulation tools, particularly Cisco Packet Tracer, in resource-constrained higher education settings. *Education Sciences*, 14(10), 1099. <https://doi.org/10.3390/educsci14101099>
2. Zhang Y., Liang R., & Ma H. (2012). Teaching innovation in computer network course for undergraduate students with Packet Tracer. *IERI Procedia "AI-Based Adaptive Feedback in Simulations for Teacher Education: An Experimental Replication in the Field"*. <https://doi.org/10.1111/jcal.13123>
3. Bauer E., et al. (2024). AI-based adaptive feedback in simulations for teacher education: An experimental replication in the field. *Journal of Computer Assisted Learning*, 41(1). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jcal.13123>
4. Roe J., Perkins M., et al. (2024). Understanding student and academic staff perceptions of AI use in assessment and feedback. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.15808>
5. Fazlollahi A. M., Bakhaidar M., Alsayegh A., et al. (2022). Effect of artificial intelligence tutoring vs expert instruction on learning simulated surgical skills among medical students: A randomized clinical trial. *JAMA Network Open*, 5(2), e2149008. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2021.49008>
6. Escalante, J., Pack, A., & Barrett, A. (2023). AI-generated feedback on writing: Insights into efficacy and ENL student preference. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20, 57. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00425-2>
7. Martin, A. F., Tubaltseva, S., Harrison, A., & Rubin, G. J. (2025). Participatory co-design and evaluation of a novel approach to generative AI-integrated coursework assessment in higher education. *Behavioral Sciences*, 15(6), 808. <https://doi.org/10.1080/02602938.2025.2487495>

## EVALUATING THE EDUCATIONAL EFFECTIVENESS OF AI-BASED ASSESSMENT SYSTEMS

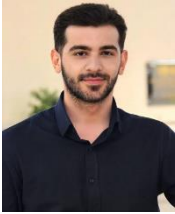
Osmanli T.E., Refizade U.R.

**Abstract.** The integration of technology, particularly artificial intelligence-based assessment and feedback mechanisms, has become a key factor in enhancing the quality of learning in modern education systems. This study presents a comparative analysis of automated and traditional evaluation methods in the development of practical skills in network administration. Sixteen students participated in the experiment and were randomly divided into two groups. Both groups completed the same simulation task, but were assessed using different evaluation approaches. The automated group's results were analyzed using Python scripts and evaluated based on statistical indicators. Findings showed that students receiving automated feedback achieved higher accuracy,

completed tasks in less time, and demonstrated higher motivation. T-test results confirmed that these differences were statistically significant. This approach not only improves learning effectiveness and transparency but also reduces the workload on instructors by enabling personalized and adaptive learning environments. The study suggests that future research can explore the applicability of this model in other subject areas such as programming, electronics, and mathematics.

**Keywords.** artificial intelligence, automated assessment, feedback systems, educational effectiveness, simulation-based learning, network administration, adaptive learning

## SÜNİ İNTELLEKTƏ ƏSASLANAN AVTONOM ROVERİN REAL VAXTLI BİTKİ XƏSTƏLİKLƏRİNİN AŞKARLANMASI VƏ TORPAQ ANALİZİ ÜÇÜN DİZAYNI VƏ TƏTBİQİ



**Həsənov H.B.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
hesenovhuseyn666@gmail.com



**Hüseynov N.E.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
namig.huseynov@naa.edu.az

**Xülasə.** Bu tədqiqat işində görüntü analizi alqoritmləri və sensor texnologiyası ilə təchiz edilmiş ağıllı rover tipli robot platforması hazırlanmış və sınaqdan keçirilmişdir. Robotun mexaniki dizaynı SolidWorks proqram təminatında modellənmiş və onun palçıqlı və quru torpaq şəraitində etibarlı işləyə bilməsi nəzərə alınaraq optimallaşdırılmışdır. Üzərində yerləşdirilmiş yüksək dəqiqlikli kamera və Nvidia Jetson mini-kompüter vasitəsilə python proqramlaşdırma dilində hazırlanmış görüntü analizi alqoritmləri (OpenCV və NumPy kitabxanaları ilə) real vaxt rejimində bitki xəstəliklərini vizual əlamətlərə əsasən (məsələn, yarpağın saralması, solması, tökülməsi və s.) aşkar edir. Xəstəlik daşıyan bitkilər alqoritm tərəfindən müəyyən olunaraq istifadəçiyə vizual olaraq işarələnmiş formada təqdim olunur.

Bundan əlavə, robot üzərində yerləşdirilmiş torpaq nəmlik və gübrə tərkibi sensorları torpağın vəziyyətini təhlil edərək əldə olunan məlumatları yerüstü idarəetmə stansiyasına ötürür. Robotun trayektoriyası Mission Planner proqram təminatı vasitəsilə əvvəlcədən planlaşdırılır və monitoring prosesi tam avtomatlaşdırılmış şəkildə həyata keçirilir. İlk prototip sınaqları zamanı əsas diqqət görüntü alqoritmının dəqiqliyinin artırılmasına yönəldilmişdir.

Hazırlanmış sistem kənd təsərrüfatında insan əməyindən asılılığı minimuma endirərək bitki xəstəliklərinin erkən mərhələdə aşkar olunmasına, torpaq tərkibinin dəqiq təhlilinə və ümumilikdə məhsuldarlığın artırılmasına töhfə verməyi hədəfləyir.

**Açar sözlər:** torpaq sensorları, görüntü analizi, süni intellekt, Mission Planner, mobil monitoring sistemi, dəqiq aqrar robototexnika.

**Giriş.** Müasir aqrar sektorda sürətlə artan qlobal tələbat və iqlim dəyişikliyi ilə bağlı problemlər kənd təsərrüfatında texnologiyanın tətbiqini zəruri etmişdir. Ənənəvi üsullarla əkin sahələrinin monitoringi və bitkilərin sağlamlıq vəziyyətinin qiymətləndirilməsi zaman və əmək baxımından səmərəsiz, nəticələri isə qeyri-dəqiq ola bilər. Xüsusilə geniş ərazilərdə xəstəlik daşıyan bitkilərin aşkar edilməsi, torpağın nəmlik balansı və gübrə tərkibinin dəqiq müəyyən olunması kimi vacib göstəricilərin insan tərəfindən real vaxtda təhlili çətinlik yaradır. Bu kimi problemlər kənd təsərrüfatı məhsuldarlığının azalmasına və resurslardan qeyri-effektiv istifadəyə səbəb olur.

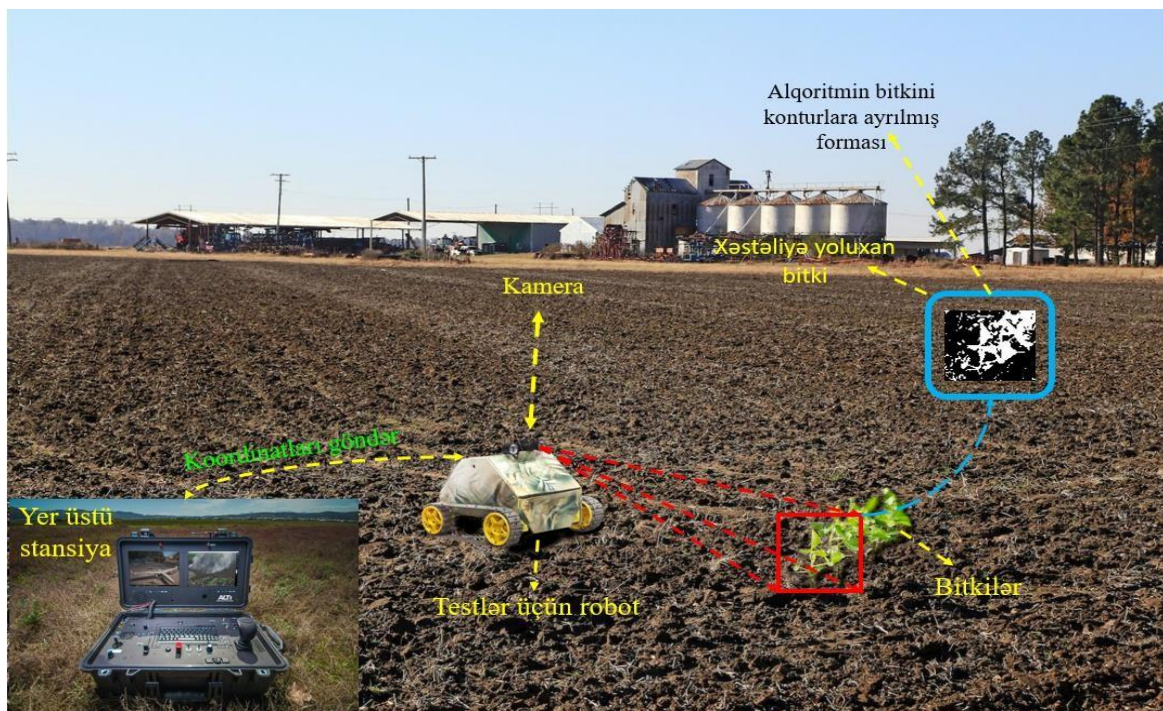
Təqdim olunan bu tədqiqat işində kənd təsərrüfatında bu problemlərin aradan qaldırılması məqsədilə süni intellekt və robototexnika texnologiyalarını özündə birləşdirən çoxfunksiyalı ağıllı



robot platforması hazırlanmışdır. Robot üzərində yerləşdirilmiş yüksək qətnaməli kamera vasitəsilə görüntü analizi alqoritmləri tətbiq edilərək sahədəki bitkilərin yarpaqlarında yaranan vizual simptomlar (solma, saralma, tökülmə və s.) əsasında xəstəlik aşkarlanması həyata keçirilir. Python proqramlaşdırma dili ilə işlənmiş bu alqoritmlər OpenCV və NumPy kimi kitabxanaların imkanlarından istifadə edilərək bitkilərin xəstəlik daşıyıcı-daşımadığını real vaxtda təyin edir və aşkar edilmiş nümunələr kompüter ekranında kontur çərçivəsi ilə vizual şəkildə əks olunur.

Bundan əlavə, robot üzərinə torpaq nəmlik və gübrə tərkibi sensorları inteqrasiya edilmişdir. Bu sensorlar torpağın fiziki göstəricilərini ölçərək məlumatları yerüstü idarəetmə stansiyasına ötürür. Robotun trayektoriyası və koordinatları Mission Planner proqram təminatı vasitəsilə əvvəlcədən planlaşdırılır, sistem üzərində yerləşdirilmiş mini kompüter (Nvidia Jetson) isə həm görüntü emalını, həm də nəzarət funksiyalarını icra edir. Robotun mexaniki dizaynı SolidWorks proqramında işlənmiş və çətin relyef, palçıqlı və ya quru torpaq şəraitində stabil hərəkət imkanına malik formada modellənmişdir. Dizayn mərhələsində yüngüllük və davamlılıq prinsiplərinə əsaslanaraq plastik və alüminium materiallardan istifadə nəzərdə tutulmuşdur.

Layihənin ilkin mərhələsində tələbə modelizm emalatxanasında hazırlanan test robotu üzərində görüntü emalı alqoritmlərinin sınaqları aparılmış və alqoritmin dəqiqliyinin artırılması istiqamətində optimallaşdırmalar həyata keçirilmişdir (Şəkil 1). Bu tədqiqat, kənd təsərrüfatında insan əməyinə tələbatı minimuma endirərək, xəstəliklərin erkən mərhələdə aşkarlanması, torpaq tərkibinin dəqiq təhlili və ümumilikdə məhsuldarlığın artırılması baxımından əhəmiyyətli töhfə verir. İşin ümumi izahı Şəkil 1-də göstərilmişdir.



Şəkil 1. Missiyanın icrası prosesi

**Ədəbiyyat icmalı.** Aqrar sahədə texnologiyaların tətbiqi son onilliklərdə diqqət mərkəzinə çevrilmiş və kənd təsərrüfatında məhsuldarlığın artırılması, resursların optimallaşdırılması və insan əməyinə olan ehtiyacın azaldılması baxımından mühüm rol oynamışdır. Xüsusilə süni intellekt və robototexnika texnologiyalarının inkişafı ilə bu sahədə daha dəqiq, sürətli və çevik qərarvermə imkanları ortaya çıxmışdır.

**Süni intellekt və görüntü analizi texnologiyalarının aqrar sahədə tətbiqi.** Əkin sahələrində bitki xəstəliklərinin erkən mərhələdə aşkarlanması üçün görüntü analizi və süni intellekt



texnologiyalarından geniş istifadə olunur. Ədəbiyyatda yer alan bir çox tədqiqatlarda konvolusional neyron şəbəkələri (CNN), dərin öyrənmə və maşın öyrənməsi modelləri bitki yarpaqlarındakı vizual dəyişikliklər əsasında xəstəliklərin təsnifləndirilməsi məqsədilə istifadə edilmişdir. Məsələn, Mohanty və digərləri tərəfindən aparılan tədqiqatda, müxtəlif bitki növlərinə aid 50,000-dən çox şəkil üzərində öyrədilən CNN modeli ilə 26 müxtəlif xəstəliyin 99%-ə yaxın dəqiqliklə aşkar olunduğu göstərilmişdir.

Bu texnologiyaların tətbiqi nəticəsində təkcə vizual simptomlara əsaslanaraq deyil, həm də multispektral və termal görüntülərdən istifadə olunmaqla daha geniş diaqnostik imkanlar əldə edilir. Lakin bu sistemlər əsasən laboratoriya şəraitində və ya sabit kamera qurğularında sınaq edilmiş, real sahə şəraitində mobil tətbiq imkanları məhdud qalmışdır.

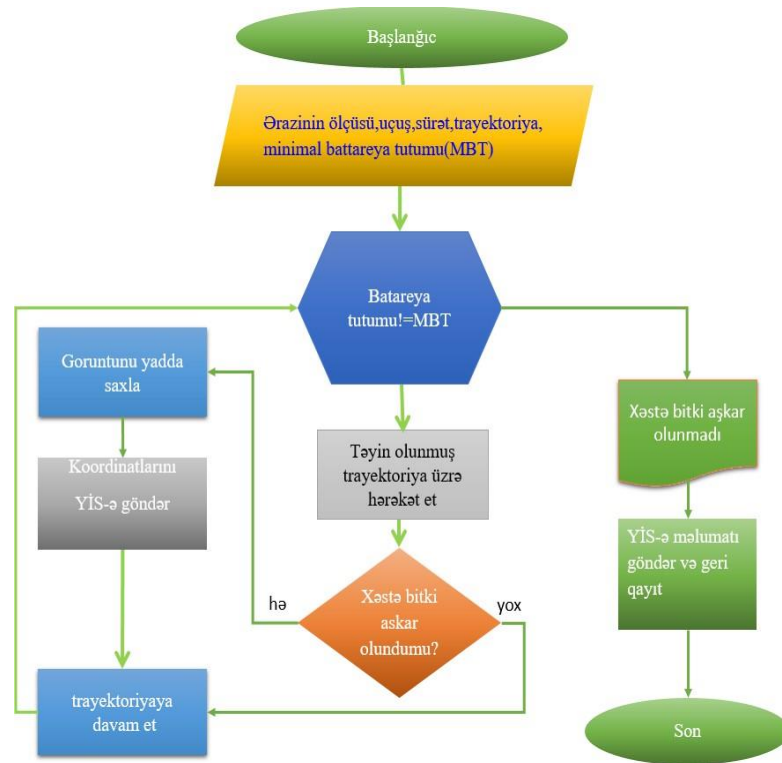
**Torpaq sensorları və əkin sahələrinin monitorinqi.** Torpağın fiziki və kimyəvi tərkibinin monitorinqi kənd təsərrüfatı fəaliyyətində gübrələmə, suvarma və əkin planlaması baxımından həyati əhəmiyyət kəsb edir. Ənənəvi üsullarla torpaq analizi vaxt və resurs baxımından sərfəlidir, lakin real vaxt rejimində monitorinq imkanlarını təmin etmir. Müasir tədqiqatlarda torpaq nəmlik sensorları (məsələn, capacitive və resistive növlər), EC (elektrik keçiricilik) sensorları və pH analizatorlarından istifadə olunaraq torpaq vəziyyəti barədə operativ məlumatların əldə olunması mümkün olmuşdur. Eyni zamanda, bu sensorlar dron və ya mobil robot platformalar üzərinə yerləşdirilərək geniş sahələrdə yüksək qətnaməli məlumatların toplanması və qərar qəbul etmə proseslərinin avtomatlaşdırılması istiqamətində mühüm irəliləyişlər əldə edilmişdir.

**Mövcud tədqiqatlardan fərqləndirici cəhətlər.** Təqdim olunan bu tədqiqat işinin əsas fərqləndirici xüsusiyyəti süni intellekt alqoritmləri və torpaq sensorlarının vahid mobil platforma üzərində birləşdirilərək real sahə şəraitində sinxron işləməsinin təmin olunmasıdır. Əvvəlki işlərdə görüntü emalı və torpaq analizi texnologiyaları əsasən ayrı-ayrılıqda tətbiq olunmuş və əksəriyyəti stasionar sistemlər üzərində sınaq edilmişdir. Bu layihədə isə həm bitki xəstəliklərinin aşkarlanması, həm də torpaq tərkibinin təhlili eyni robot tərəfindən eyni vaxtda aparılır və bütün məlumatlar yerüstü stansiyağa ötürülür. Bundan əlavə, trayektoriya əvvəlcədən planlaşdırılması, real vaxtda monitorinq və alqoritm dəqiqliyinin artırılmasına yönəlik lokal testlər bu işin praktik tətbiq baxımından səmərəliliyini artırır.

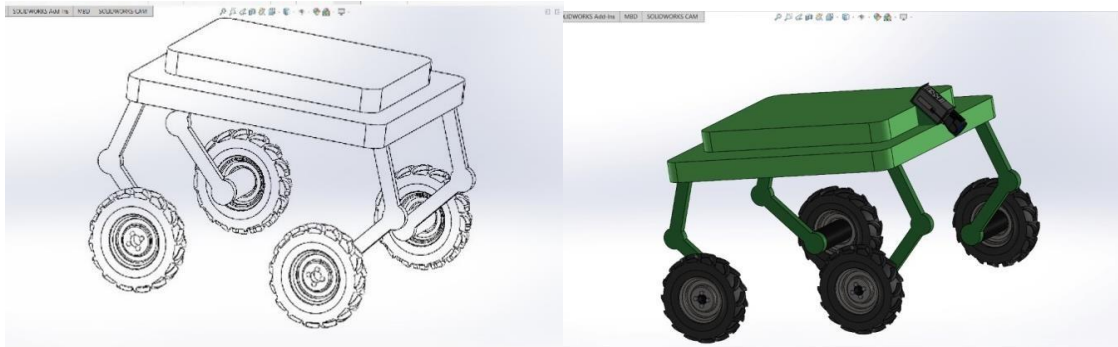
**Metodologiya.** Bu tədqiqatda aqrar sahədə bitki sağlamlığının monitorinqi və torpaq tərkibinin analizini həyata keçirən ağıllı robot platformasının hazırlanması prosesi təsvir edilmişdir. Robotun funksional tələblərinə uyğun olaraq mexaniki dizayn, avtonom idarəetmə və süni intellekt əsasında görüntü analizi alqoritmlərinin tətbiqi mərhələləri həyata keçirilmişdir (Şəkil 2).

**Robot platformanın dizaynı.** Robotun mexaniki quruluşu SolidWorks proqram təminatında hazırlanmış və müxtəlif əkin şəraitlərinə palçıqlı, quru və əkilmiş torpaq uyğunluq nəzərə alınmışdır. Dizayn mərhələsində yüngül, davamlı və sərfiyyət baxımından effektiv materiallardan alüminium və plastikdən istifadə olunmuşdur. Hərəkət sistemi sahədə maneələri aşmağa və stabil fəaliyyət göstərməyə imkan verəcək şəkildə qurulmuşdur və model olaraq Şəkil 3-də göstərilmişdir.

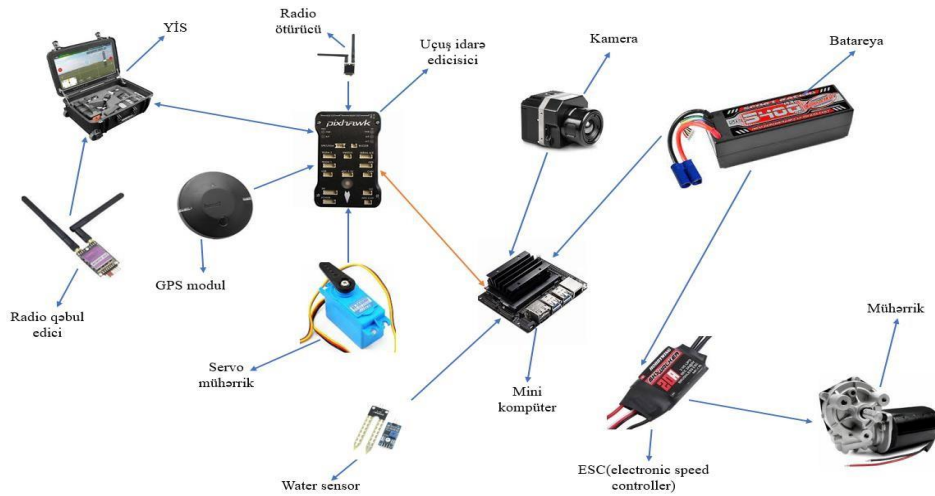
**Mexaniki və elektrik komponentlərin seçimi.** Robotun hərəkətini təmin edən mühərriklər və idarəetmə modulları, enerji təminatı üçün uyğun batareya sistemi seçilmişdir. Elektrik komponentlərə robotun idarə olunmasını və sensorlardan gələn məlumatların toplanmasını təmin edən kontroller (mikrokompyuter və ya mikrokontroler) daxildir. Robot üzərində həmçinin yerli prosessor kimi Nvidia Jetson mini-kompyuteri quraşdırılmışdır ki, bu da yüksək hesablama gücü tələb edən görüntü analizi alqoritmlərinin işlənməsi üçün vacibdir. Elektronik komponentlərin təsvirləri və qoşulma ardıcılıqları Şəkil 4-də göstərilir.



Şəkil 2. Layihənin alqoritmik bol sxemi



Şəkil 3. Platformanın solidworks 3D modeli



Şəkil 4. Elektronik komponentlərin yığılması

Cədvəl 1  
Elektronik komponentlərin yığılı

| Elektronik və mexaniki hissələr | Məhsulun Adı              | Say |
|---------------------------------|---------------------------|-----|
| Mühərrik                        | 5840-31ZY Worm Gear Motor | 2   |
| Kamera                          | Raspberry pi camera       | 1   |
| Konstruksiya materialları       | Metal və plastik material | ~   |
| Təkərlər                        | Technology tractor wheel  | 4   |
| Su sensoru                      | Fc 28                     | 1   |
| Servo motor                     | SG90 RC servo motor       | 2   |

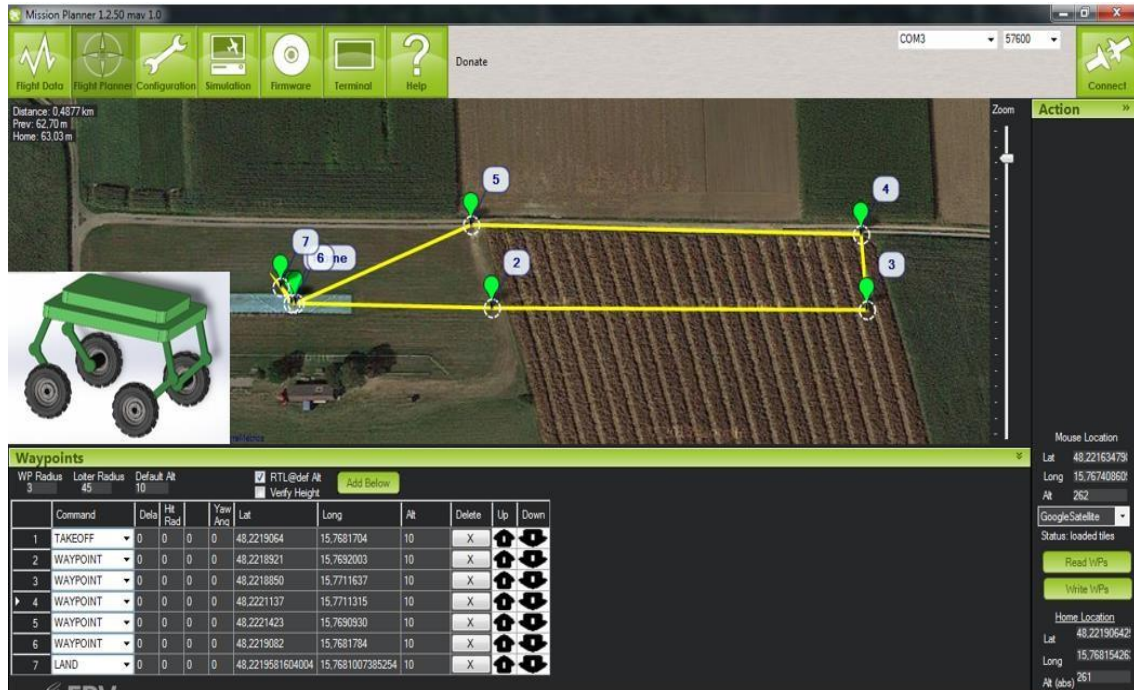
**Kamera və görüntü analizi alqoritmlərinin tətbiqi.** Robot üzərinə yüksək qətnaməli kamera yerləşdirilmişdir. Kamera vasitəsilə real vaxtda əldə olunan şəkillər Python proqramlaşdırma dilində OpenCV və NumPy kitabxanalarının funksiyalarından istifadə olunmaqla işlənir. Bitkilərin yarpaqlarında yaranan vizual dəyişikliklər (saralma, solma, tökülmə və s.) əsasında xəstəliklərin aşkarlanması üçün süni intellekt modelləri tətbiq edilmişdir. Bu məqsədlə konvolyusional neyron şəbəkə (CNN) əsasında model öyrədilmiş və 1000-dən çox şəkil üzərində test edilmişdir.

**Bitki xəstəliklərinin aşkar olunması üçün süni intellekt modeli.** Təqdim olunan layihədə əsas görüntü emalı alqoritmı CNN modelinə əsaslanır. Bu model, təlim mərhələsində bitki yarpaqlarındakı xəstəlik əlamətlərini dəqiq tanımaq üçün müxtəlif bitki növlərindən toplanmış təsnif edilmiş şəkillərlə öyrədilmişdir. Modelin işləmə sürəti və dəqiqliyi real vaxt şəraitində optimallaşdırılmışdır ki, bu da robotun sahədə effektiv fəaliyyətinə imkan verir.

**Sensorlar və məlumat ötürülməsi.** Robotun torpaq vəziyyətini qiymətləndirmək üçün nəmlik və gübrə tərkibi sensorları quraşdırılmışdır. Bu sensorlar vasitəsilə toplanan fiziki və kimyəvi göstəricilər real vaxt rejimində işlənir və robotdan yerüstü idarəetmə stansiyasına simsiz rabitə (LoRa, Wi-Fi və ya Zigbee texnologiyası) vasitəsilə ötürülür. Yerüstü stansiyada toplanan məlumatlar operator tərəfindən təhlil edilərək optimal suvarma və gübrələmə strategiyaları müəyyən edilir.

**Proqram təminatı və süni intellekt alqoritmının işləmə prinsipi.** Robot üzərində yerləşdirilən idarəedici qurğu müxtəlif sensorlardan – jiroskop, kompas, GPS, su sensoru (FC-28), akselerometr və spidometrəndən telemetriya məlumatlarını toplayaraq bu məlumatları yerüstü idarəetmə stansiyasına ötürür. Bundan əlavə, robotun üzərində yerləşdirilmiş mini-kompüterdə işləyən süni intellekt əsaslı görüntü analizi alqoritmı real vaxt rejimində görüntüləri emal edir və zəruri hallarda analiz edilmiş görüntüləri yaddaşda saxlayır (Şəkil 5). Lazım olduqda isə həmin görüntülər idarəetmə qurğusu vasitəsilə yerüstü stansiyaya ötürülə bilər.

Süni intellekt alqoritmı əvvəlcədən sağlam və xəstəliklərlə yoluxmuş bitkilərin minlərlə görüntüsü əsasında təlimləndirilib. Alqoritm piksellər səviyyəsində şəkilləri təhlil edərək bitkiləri digər obyektlərdən rəng palitrası dəyişikliklərinə əsaslanaraq ayırır. Bitkiyə uyğun rəng palitrası aşkar edildikdə həmin obyekt ekran üzərində çərçivə ilə işarələnir. Əgər çərçivəyə alınmış bitkinin xəstəlik əlamətləri mövcuddursa, robotun mövcud coğrafi koordinatları yerüstü idarəetmə stansiyasına göndərilir.



Şəkil 5. Mission planner programında missiyanın qurulması

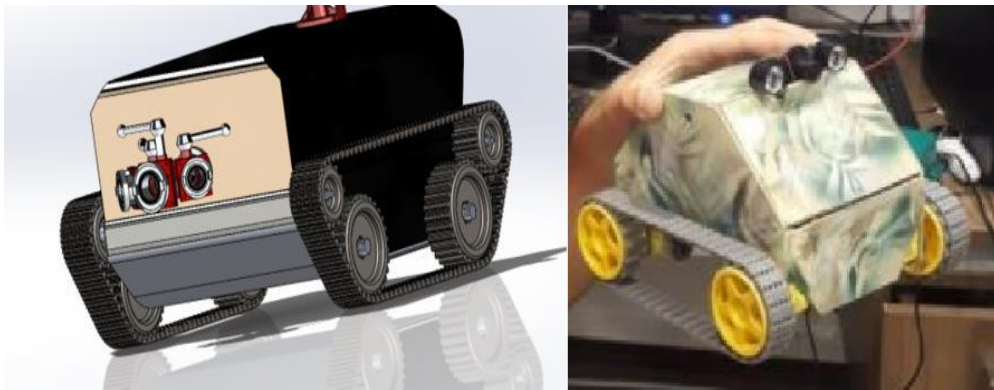
Proqram təminatı açıq mənbə kodlu olaraq hazırlanıb və yüksək modularlığa malikdir, belə ki, alqoritmin müxtəlif obyektlərin tanınması üçün asanlıqla tənzimlənməsi mümkündür. Kamera vasitəsilə təyin olunan obyektə olan məsafə və onun robota nisbətən yerləşdiyi bucaq da proqram tərəfindən hesablanır (Şəkil 6). Bu xüsusiyyət robotun avtonom rejimdə istənilən obyekti izləməsinə imkan yaradır və sistemin çoxfunksiyallığını artırır.



Şəkil 6. Sağlam bitkilər ilə xəstəlik yoluxmuş bitkilərin aşkar edilməsi

**Təcrübə və nəticələr.** Bu tədqiqat çərçivəsində hazırlanan ağıllı robot platformasının funksionallığı müxtəlif əkin şəraitlərində palçıqlı və quru torpaq daxil olmaqla sınaqdan keçirilmişdir. Testlər zamanı robotun mexaniki dayanıqlığı, görüntü analizi alqoritmlərinin performansı, sensor məlumatlarının etibarlılığı və məlumatların yerüstü stansiyağa ötürülməsi effektivliyi qiymətləndirilmişdir.

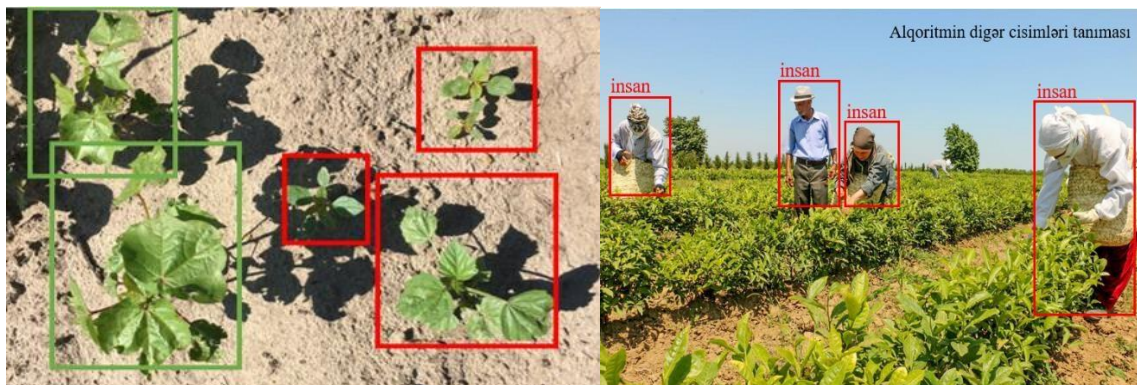




Şəkil 7. Sınaq robot platformasının modeli

**Robotun müxtəlif şəraitlərdə sınaq nəticələri.** Robotun mexaniki sistemi mürəkkəb relyefli, palçıqlı və quru torpaq sahələrində stabil hərəkət göstərə bilmişdir. Sınaq mərhələsində robotun maneələrdən keçmə bacarığı və enerji sərfiyyatı müşahidə olunmuş, nəticələr dizayn mərhələsində nəzərdə tutulmuş kriteriyalara uyğun olduğu təsdiq edilmişdir. Palçıqlı şəraitdə robotun sürətində azalma müşahidə edilsə də, sensor və kamera funksionallığı tam şəkildə qorunmuşdur. Sınaq üçün hazırlanan robot 3D modeli ilə Şəkil 7-də təsvir olunmuşdur.

**Görüntü analizi alqoritminin dəqiqliyi və aşkar etmə qabiliyyəti.** Python dilində işlənmiş görüntü emalı və süni intellekt modelləri test zamanı yüksək dəqiqliklə xəstəlik daşıyan bitkiləri aşkar etmişdir. Model 1000-dən çox xəstəlikli bitki nümunəsi üzərində sınaqdan keçirilmiş və ümumi düzgün təsnifat dərəcəsi 93% səviyyəsində olmuşdur. Real vaxtda görüntülərin işlənməsi sayəsində xəstəlik aşkar edilən bitkilər ekranda rəngli konturla vurğulanmışdır (Şəkil 8).



Şəkil 8. Bitkilər ilə ətrafdakı digər obyektlərin fərqləndirilməsi

**Sensorlardan alınan məlumatların etibarlılığı.** Torpaq nəmlik və gübrə tərkibi sensorlarından əldə olunan göstəricilər laboratoriya şəraitində aparılan analizlərlə müqayisədə 95%-ə yaxın dəqiqliklə uyğunluq göstərmişdir. Sensorlar torpağın müxtəlif qatlarında və fərqli hava şəraitində dayanıqlı performans nümayiş etdirmiş, məlumatların yerüstü stansiyağa ötürülməsi fasiləsiz və itkisiz həyata keçirilmişdir.

**Məlumat ötürülməsi zamanı müşahidə edilən effektivlik.** Robot ilə yerüstü idarəetmə stansiyası arasında LoRa texnologiyası istifadə olunmuşdur. Testlər zamanı məlumat ötürülməsi məsafəsi 500 metrədək sınaqdan keçirilmiş və siqnal itkisi minimal olmuşdur. Reallıqda əkin sahəsində yerləşdirilmiş idarəetmə stansiyası vasitəsilə məlumatlar fasiləsiz qəbul edilmiş və emal üçün vaxtında təqdim olunmuşdur. Bu da sistemin operativ monitoring və idarəetmə üçün uyumlu olduğunu göstərir.

**Müzakirə.** Bu tədqiqat çərçivəsində hazırlanmış ağıllı robot platformasının müxtəlif əkin şəraitlərində aparılan testləri və alınan nəticələr, kənd təsərrüfatında texnoloji innovasiyaların



tətbiqinin praktiki faydalarını ortaya qoymuşdur. Görüntü analizi alqoritmlərinin 93%-ə yaxın dəqiqliklə bitki xəstəliklərini aşkar etməsi, həmçinin torpaq sensorlarının etibarlı məlumat verməsi sistemin real şəraitdə effektiv işləyə biləcəyini göstərir.

Mövcud sistemin əsas üstünlüklərindən biri onun çoxfunksiyalı olmasıdır; yəni həm görüntü analizi, həm də torpaq tərkibi monitorinqi eyni platforma üzərində sinxron həyata keçirilir. Bu, resursların optimallaşdırılması və məlumatların vahid mənbədən toplanması baxımından böyük üstünlükdür. Robotun mexaniki dizaynı mürəkkəb relyeflərdə də dayanıqlı işləməyi təmin edir ki, bu da geniş və müxtəlif tipli əkin sahələrində tətbiq üçün önəmlidir.

Lakin müəyyən məhdudiyyətlər də mövcuddur. Məsələn, palçıqlı və ya çox rütubətli şəraitlərdə robotun hərəkət sürəti azalır, bu isə sınaqların nəticələrinə də təsir edə bilər. Həmçinin, görüntü analizi alqoritmlərinin dəqiqliyi yüksək olsa da, çox müxtəlif bitki növlərinin və xəstəlik əlamətlərinin olduğu şəraitdə əlavə təlim və optimallaşdırma tələb olunur. Sensorlardan əldə olunan məlumatların dəqiqliyi laboratoriya şəraitində yüksək olsa da, uzun müddətli sahə şərtlərində sensorların kalibrənməsi və texniki xidmət məsələləri diqqət tələb edir.

İstifadə olunan texnologiyalar kənd təsərrüfatında dəqiq və operativ monitorinq üçün böyük potensiala malikdir. Süni intellektin tətbiqi xəstəliklərin erkən aşkarlanmasına imkan verir və bu da məhsuldarlığın artırılması və xəstəliklərlə mübarizədə vaxt itkisini minimuma endirir. Torpaq sensorları isə suvarma və gübrələmə proseslərinin optimallaşdırılmasına kömək edir, resurslara qənaət təmin edir.

Real tətbiq ssenarilərində bu sistem geniş əkin sahələrində, xüsusən də böyük fermer təsərrüfatlarında istifadə oluna bilər. Eyni zamanda, kiçik və orta ölçülü təsərrüfatlar üçün modul şəklində tətbiqi də mümkündür. Sistem təkmilləşdirilərək daha yüksək avtomatlaşdırma səviyyəsinə çatdırıla, dronlarla inteqrasiya edilərək hava və yer monitorinqi sintez edilə bilər.

Nəticə olaraq, hazırlanmış ağıllı robot platforması aqrar sahədə texnologiyanın tətbiqini genişləndirərək, kənd təsərrüfatı məhsuldarlığını artırmaq və resurslardan səmərəli istifadəni təmin etmək üçün effektiv vasitə kimi çıxış edir.

**Nəticə və təkliflər.** Bu tədqiqatda hazırlanmış ağıllı robot platforması kənd təsərrüfatında bitki xəstəliklərinin erkən mərhələdə aşkarlanması və torpaq tərkibinin real vaxt rejimində monitorinqi üçün effektiv həll təqdim etmişdir. Süni intellekt əsasında işləyən görüntü analizi alqoritmləri və inteqrasiya olunmuş torpaq sensorları sayəsində robot, geniş əkin sahələrində resursların optimal idarə olunmasını və məhsuldarlığın artırılmasını təmin edir. Aparılan testlər göstərmişdir ki, sistem həm mexaniki, həm də funksional baxımdan müxtəlif şəraitlərdə uğurla fəaliyyət göstərir.

Layihənin əsas töhfəsi kənd təsərrüfatında insan əməyindən asılılığı azaltmaq, xəstəlikləri vaxtında aşkar etmək və torpaq resurslarının vəziyyətini dəqiq təhlil etməklə səmərəli suvarma və gübrələmə strategiyalarının tətbiqinə imkan yaratmaqdır. Bu da məhsuldarlığın artırılması və ekoloji dayanıqlığın təmin olunması baxımından əhəmiyyətlidir.

Gələcək işlərdə aşağıdakı istiqamətlərdə təkmilləşdirmələr tövsiyə olunur:

- Dron inteqrasiyası: Robot platformasının hava müşahidələri üçün dronlarla sinxron işləməsi sayəsində daha geniş ərazilərin yüksək dəqiqliklə monitorinqi təmin edilə bilər.
- Daha geniş ərazilərdə testlər: Sistem real şəraitdə daha böyük və müxtəlif relyefli əkin sahələrində sınaqlara performansının geniş spektrdə qiymətləndirilməsi və optimallaşdırılması məqsəduyğun olar.
- Enerji sərfiyyatının optimallaşdırılması: Robotun batareya ömrünün artırılması və enerji idarəetmə sistemlərinin təkmilləşdirilməsi sahədə fasiləsiz fəaliyyət üçün vacibdir.
- Sənaye və fermer təsərrüfatlarında tətbiqi: Hazırlanmış sistemin kommersiyalaşdırılması və müxtəlif ölçülü təsərrüfatlarda tətbiqi üçün əlavə sınaqlar və uyğunlaşdırmalar həyata keçirilməlidir.

### Ədəbiyyat

1. Fedorov, D. E. (2022). Modern trends in developing robotic systems in agro-industrial complex. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 949(1), 012016.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/949/1/012016>
2. Hemming, J. (2018). Automation and robotics in the protected environment, current developments and challenges for the future.
3. Institut national de recherche en informatique et en automatique. (1992). Bulletin of Sociological Methodology/Bulletin de Méthodologie Sociologique, 37(1), 55–57.  
<https://doi.org/10.1177/075910639203700105>
4. Lu, Y., & Young, S. (2020). A survey of public datasets for computer vision tasks in precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 178, 105760.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105760>
5. Murase, H. (2000a). Biomechatronics for Agro-Industrial Applications. IFAC Proceedings Volumes, 33(19), 269–278.  
[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)40923-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)40923-2)
6. Murase, H. (2000b). Biomechatronics for Agro-Industrial Applications. IFAC Proceedings Volumes, 33(19), 269–278.  
[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)40923-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)40923-2)
7. Pretto, A., Aravecchia, S., Burgard, W., Chebrolu, N., Dornhege, C., Falck, T., Fleckenstein, F., Fontenla, A., Imperoli, M., Khanna, R., Liebisch, F., Lottes, P., Milioto, A., Nardi, D., Nardi, S., Pfeifer, J., Popovic, M., Potena, C., Pradalier, C., ... Nieto, J. (2021). Building an Aerial–Ground Robotics System for Precision Farming: An Adaptable Solution. IEEE Robotics & Automation Magazine, 28(3), 29–49.  
<https://doi.org/10.1109/MRA.2020.3012492>
8. Tiwari, S., Yadav, L. M., Mishra, S., & Shrivastava, R. (2025). Revolutionizing Agro-Processing: The Role of Robotics and Mechatronics in Sustainable Automation. 12(1).
9. Kumar, R., & Pal, D. K. K. (n.d.). Artificial Intelligence (AI)-Driven Transformation: Sustainable Development of Agro-Based Industries in Bihar.
10. Ghazal, S., Munir, A., & Qureshi, W. S. (2024). Computer vision in smart agriculture and precision farming: Techniques and applications. Artificial Intelligence in Agriculture, 13, 64–83.  
<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.06.004>
11. Hesenov, H., & Huseynov, N. (2025). Autonomous UAV-Based Mortar Round Deployment with Real-Time Ballistic Correction. Preprints.  
<https://doi.org/10.22541/au.174905423.33977348/v2>

### DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED AUTONOMOUS ROVER FOR REAL-TIME PLANT DISEASE DETECTION AND SOIL ANALYSIS

Hesenov H.B., Huseynov N.E.

**Abstract.** *In this research, an intelligent rover-type robotic platform equipped with image analysis algorithms and sensor technology was developed and tested. The robot's mechanical*

design was modeled in SolidWorks software and optimized to ensure reliable operation in both muddy and dry soil conditions. Using a high-resolution camera and an NVIDIA Jetson mini-computer mounted on the rover, image analysis algorithms developed in Python (with OpenCV and NumPy libraries) detect plant diseases in real time based on visual symptoms (e.g., yellowing, wilting, or shedding of leaves). Diseased plants are identified by the algorithm and presented to the user with visual markings.

In addition, soil moisture and fertilizer composition sensors installed on the robot analyze the soil condition and transmit the collected data to a ground control station. The robot's trajectory is pre-planned using the Mission Planner software, and the monitoring process is carried out in a fully automated manner. During initial prototype testing, primary attention was focused on improving the accuracy of the image analysis algorithm.

The developed system aims to reduce dependence on human labor in agriculture, enable early detection of plant diseases, provide precise analysis of soil composition, and ultimately contribute to increased agricultural productivity.

**Keywords.** torpaq sensorları, görüntü analizi, süni intellekt, Mission Planner, mobil monitoring sistemi, dəqiq aqrar robototexnika.

## BÖYÜK HƏCMLİ, MÜXTƏLİF TƏYİNATLI ANBARLARIN SÜNİ İNTELLEKT ƏSASINDA İDARƏETMƏ METODLARININ YARADILMASI



**Ağazadə S.N.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
sabina.aghazada@naa.edu.az



**Əhmədzadə F.X.R.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
fidan.ahmadzada@naa.edu.az

**Xülasə.** Müasir dövrdə anbarların idarə olunması sahəsində məhsulların çeşidi və həcmi sürətlə artması ilə bərabər onların düzgün və səmərəli yerləşdirilməsi də önəmlidir. Bu cür sistemlərdə köhnə idarə üsulları bəzən yəqinli olmur, buna görə insan resurslarına olan tələbat da artır. Belə hallarda qərar vermək üçün yeni yollar lazımdır. Bu məqalədə böyük anbarların süni intellekt əsasında idarəsi texnologiyaları araşdırılmışdır və prototip program hazırlanmışdır. Burada əsas məqsəd - məhsulların dövriyyəsi, təhlükəlilik səviyyəsi və ölçüləri üzrə optimal yerləşdirmək üçün ağıllı sistemin yaradılmasıdır.

**Açar sözlər:** süni intellekt, anbar idarəetməsi, logistika, avtomatlaşdırma, əməliyyat səmərəliliyi, məlumat əsaslı qərarlar, SAP, DHL

**Giriş.** Müasir dövrdə sürətlə inkişaf edən texnologiya və dəyişən istehlakçı tələbləri fonunda sənaye, ticarət, kənd təsərrüfatı və xidmət sahələrində məhsulların saxlanması, daşınması və dövriyyəsinin təşkilində səmərəlilik və effektivlik əsas uğur amillərindən biridir [1]. Bu kontekstdə anbarlar bu proseslərin mərkəzində durur və təchizat zəncirinin mürəkkəb funksiyalarını icra edən əsas əlaqələndirici strukturlardan birinə çevrilmişdir. Lakin artan tələblər və resurs optimallaşdırılması ehtiyacları fonunda ənənəvi idarəetmə metodlarının çatışmazlıqları özünü göstərməkdədir. Bu səbəbdən, süni intellektin və onun müxtəlif tətbiq sahələrinin anbar idarəçiliyinə inteqrasiyası günümüzdə diqqət mərkəzində olan tədqiqat istiqamətlərindəndir [2].

Süni intellekt (Sİ) - insanın düşüncə işlərini təqlid edən kompüter sistemləri və alqoritmlərdən ibarətdir. Sİ sistemləri bu qabiliyyətlərə sahibdir [3]:

- Öyrənmək
- Mühakimə yürütmək
- Planlamaq
- Qərar qəbul etmək

Əsas texnologiyalar bunlardır [4,5]:

- Maşın öyrənməsi
- Dərin öyrənmə
- Neyron şəbəkələr
- Ekspert sistemlər
- Təbii dilin emalı
- Qərar dəstək sistemləri

Süni intellekt texnologiyalarının anbar idarəetmə sistemlərinə integrasiyası aşağıdakı faydaları təmin edir [6].

- Resursların səmərəli bölüşdürülməsi
- Tələbatın daha dəqiq proqnozlaşdırılması
- İnsan əməyinin azaldılması
- Səhvlərin azaldılması və keyfiyyətini artırmaq
- Əməliyyatlarda yüksək səmərəlilik

DHL və SAP kimi təşkilatlar bu texnologiyaları artıq praktikada tətbiq edərək, əməliyyat səmərəliliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırmışdır [7,8].

**Məsələnin qoyuluşu.** Böyükhəcmli və müxtəlif təyinatlı anbarların idarə olunması intellektual idarəetmə sisteminin ilkin variantının hazırlanması

**Həll üsulu.** Böyükhəcmli və müxtəlif təyinatlı anbarların idarə olunmasında səmərəlilik, dəqiqlik və vaxt faktorları olduqca önəmlidir. Bu tələblərə cavab vermək üçün "LISA" (Location-Intelligent Storage Allocation) adlı alqoritm əsasında intellektual idarəetmə sistemi yaradılmışdır. Bu alqoritmi [3] tətbiq etməklə məhsulların dövriyyəsini, təhlükəlilik səviyyəsini və ölçülərini nəzərə alaraq onlara anbarda optimal yer tapmağı müəyyən etmək olar. LISA iki ssenari əsasında qurulmuşdur:

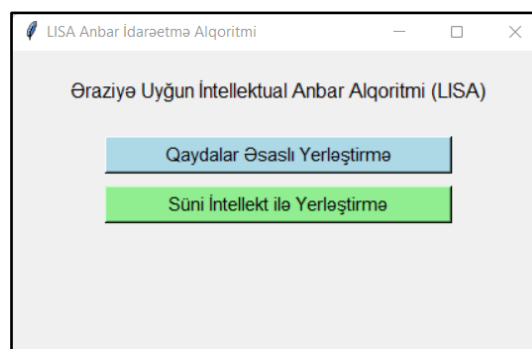
1. Qaydalar əsaslı yanaşma (Rule-Based): Sadə bir funksional qiymətləndirmə sistemi yaradılır. Məhsulun dövriyyəsi, təhlükəlilik dərəcəsi kimi faktorlara görə zonalara qiymət verilir və ən yüksək dəyərli zona seçilir.
2. Süni İntellektə əsaslanan yanaşma (Q-learning): Proqram zamanla sınaq edərək ən optimal yerləşdirmə planını öyrənir. Həmçinin, süni intellekt təkrarlanan epizodlar vasitəsilə öyrənir ki, əvvəlcə təxminlərə dayanan, sonra isə daha dəqiq və uyğun qərarlar qəbul edir.

Yaradılmış proqramda ilk öncə məhsul adı, ölçüsü, dövriyyə kateqoriyası (A, B, C), təhlükəlilik və əlaqəli məhsullar daxil edilməklə CSV fayl yaradılıb (Cədvəl 1). Bu fayl məhsul bazası kimi istinad edilir.

Cədvəl 1.  
Məhsullar haqqında məlumatlar

|   | A        | B      | C        | D         | E         |
|---|----------|--------|----------|-----------|-----------|
| 1 | Product  | Volume | Turnover | Hazardous | Pairing   |
| 2 | Phone    | 1      | A        | FALSE     | Earphones |
| 3 | Printer  | 3      | C        | FALSE     | Paper     |
| 4 | Chemical | 21     | B        | TRUE      |           |

İstifadəçi interfeysi yaradılıb (Şəkil 1). Burada 2 düymə vasitəsilə sistemin istənilən rejimi aktivləşdirilə bilər:



Şəkil 1. İstifadəçi interfeysi



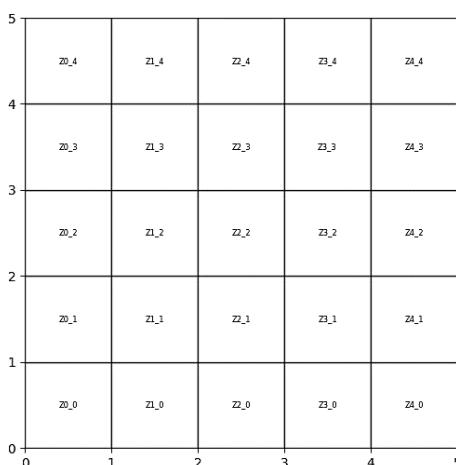
Bu hissədə məhsulun Turnover (tezliklə çıxan məhsul) və Hazardous (təhlükəli olub-olmaması) kriteriyalarına görə zonaların dəyəri hesablanır və ən uyğun zona seçilir.

Daha sonra, hansı məhsul hansı zonaya, niyə yerləşdirildi, detalları ilə qeyd olunur (Şəkil 2).

Q-Learning Placement Results:  
- Phone -> Z1\_0  
- Printer -> Z0\_0  
- Chemical -> Z3\_4

**Şəkil 2.** Məhsulların yerləşdiyi zona

**Hesablama eksperimenti.** 5x5 zonadan ibarət olan anbar xəritəsi yaradılıb. Bu vizual xəritə əyani olaraq məhsulların yerləşdirildiyi zonaları göstərir (Şəkil 3).



**Şəkil 3.** Anbar xəritəsi

Hər iki ssenari üzrə anbar nəticələrinin müqayisəsi aparılmışdır (Cədvəl 2). Müqayisə mənbələrə, nəticələrin çevikliyinə, hesablama vaxtına və sənaye istifadəsi imkanlarına görə aparılmışdır. Müqayisənin nəticələri göstərir ki, süni intellekt əsaslı sistem bütün parametrlərə görə qaydalar əsaslı sistemdən üstündür və daha mürəkkəb və müxtəlif növlü məhsulu olan anbarlar üçün yararlıdır.

Cədvəl 2.  
Qaydalar əsaslı və süni intellekt yanaşmalarının müqayisəsi

| Özəllik           | Qaydalar əsaslı           | Süni İntellekt (Q-learning)       |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Mənbə             | Əlavələr edilmiş qaydalar | Öyrənmə prosesi əsaslı            |
| Çeviklik          | Statik və sabit           | Dinamik və adaptiv                |
| Hesablama vaxtı   | Az                        | Orta                              |
| Sənaye istifadəsi | Kiçik sistemlər üçün      | Çox mürəkkəb sistemlərdə uyğundur |

**Hesablamaların təhlili.** Simulyasiya nəticələri göstərir ki, qaydalara əsaslanan sistemlər sadə mühitlərdə effektiv işləyir. Lakin çoxsaylı meyarların mövcud olduğu real anbar şəraitində bu sistemlərin adaptivliyi zəif olur. Q-learning modeli isə ilkin mərhələdə sadəcə test etməklə başlayır, lakin zamanla optimal yerləşdirmə strategiyası formalaşdırır. Bu isə idarəetmənin çevikliyini artırır, resurslardan daha səmərəli istifadə olunmasına və avtomatlaşdırma səviyyəsinin yüksəlməsinə şərait yaradır.

**Nəticə.** Anbar idarə edilməsində süni intellekt texnologiyaların tətbiqi yalnız texnoloji yenilik deyil, həm də məlumat mərkəzli, sistemli yanaşma tələb edən bir dəyişiklikdir. Xüsusilə böyük və müxtəlif anbarlarda süni intellekt əsaslı idarə etmə daha çevik, təhlükəsiz və maliyyə baxımından faydalı sistemlər yaratmağa imkan tanıyır. Amma yeni texnologiyalar ilə bərabər, insan resursları və mövcud şəraitin düzgün inteqrasiyası da vacibdir. Bu sahədə yerli tətbiqlər üçün elmi araşdırmalar, müxtəlif layihələr önəmli rol oynayır.

### Ədəbiyyat

1. Christopher, M. (2016). Logistics & Supply Chain Management (5-ci buraxılış). Pearson Education.
2. Russell, S., & Norvig, P. (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4-cü buraxılış). Pearson.
3. Waller, M. A., & Fawcett, S. E. (2013). "Data Science, Predictive Analytics, and Big Data: A Revolution That Will Transform Supply Chain Design and Management." Journal of Business Logistics, 34(2), 77–84.
4. Ivanov, D., Tsipoulanidis, A., & Schönberger, J. (2018). Global Supply Chain and Operations Management: A Decision-Oriented Introduction to the Creation of Value (2-ci buraxılış). Springer.
5. Zhang, A., & Kettinger, W. J. (2021). "Digital Supply Chain Transformation: Towards a Conceptual Framework." Information & Management, 58(6), 103456.
6. Amazon Robotics. (2023). "Automation in Fulfillment Centers."  
<https://www.aboutamazon.com/news/operations/automation-in-fulfillment-centers>
7. DHL. (2022). AI in Logistics: Balancing Efficiency and Complexity. DHL Trend Research.
8. SAP. (2023). SAP AI Core for Intelligent Logistics.  
<https://www.sap.com/products/artificial-intelligence.html>

## DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED MANAGEMENT METHODS FOR LARGE-SCALE AND MULTI-PURPOSE WAREHOUSES

Agazade S.N., Ahmadzada F.KH.R

**Abstract.** In modern warehouse management, the variety and volume of products are rapidly increasing, and their correct and efficient placement is also important. In such systems, old management methods are sometimes not enough, which increases the demand for human resources. In such cases, new ways of making decisions are needed. In this article, artificial intelligence-based management technologies for large warehouses are investigated and a prototype program is developed. The main goal here is to create an intelligent system for optimal placement of products in terms of turnover, hazard level and size.

**Keywords:** artificial intelligence, warehouse management, logistics, automation, operational efficiency, data-driven decisions, SAP, DHL

## INTELLIGENT ORGANISATION OF SATELLITE INFORMATION SYSTEMS WITH PATTERN RECOGNITION



**Ibrahimova S.R.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
sibrahimova@naa.edu.az

**Abstract.** *The integration of satellite information systems with pattern recognition techniques represents an important step forward in how we work with space-derived data. In this paper, we propose a framework that draws on artificial intelligence methods.*

*In recent years, intelligent systems have noticeably changed the way satellite imagery is analyzed and classified. Building on this progress, our study offers a fresh perspective on the role of AI-based tools in remote sensing. In practice, several challenges remain. High-resolution satellite data are often extremely complex, and spatial and spectral patterns can vary in unpredictable ways; classification results may not always be consistent across datasets. To address these difficulties, we discuss strategies that help stabilize the analysis process and improve its overall reliability.*

*The integration of pattern recognition technologies more deeply into satellite data systems can raise system performance and lead to more confident decision-making in real-time settings.*

**Keywords:** *artificial intelligence, recognition, remote sensing, satellite image classification, spatial-spectral features, deep learning.*

**Introduction.** Satellite based information systems are the backbone of today's society, delivering key data for a variety of applications including environmental monitoring and national security [1]. Such systems include, inter alia, technologies and methods for collecting, processing and distributing information acquired by a satellite revolving around the earth. The deeper we plunge into these systems.

In essence, satellite information systems are systems created to collect, retain, analyses derived data of satellites. This information can be imagery, atmospheric data, and geospatial data, among others [1]. This system plays an immensely vital role as they provide valuable inputs for decision making in multiple platforms such as agriculture, meteorology, urban planning, applications in disaster management, and likewise [2]. In providing the faith, satellite information systems allow governments, agencies, and people to make timely decisions to optimize resource utilization, safety, and sustainability.

Artificial intelligence and machine learning, in particular pattern recognition, form the basis for an effective use of satellite data [3]. This includes detecting and classifying patterns in data, which is particularly useful in a time when satellite systems are accumulating massive stores of data. Using advanced algorithms to process for patterns, anomalies and trends, researchers and analysts alike will be able to gather meaningful information from raw satellite data [3]. This ability can be leveraged to improve the accuracy of a variety of applications including land cover changes assessment, vegetation health monitoring, and natural disaster recognition.

**Methods.** Rapid technological development, such as machine learning, artificial intelligence (AI), and big data analysis (BI), drives satellite information systems [4]. These advances improve performance and make it easier to collect, process, and analyze data.

Machine learning algorithms have revolutionized satellite data analysis. In a traditional sense,

the data analysis and processing of satellite images used to be manual in nature becoming a time-consuming and error-prone process. Machine learning has enabled systems to automatically learn from patterns in data and to get better over time. Supervised and unsupervised learning can be used to classify features in satellite images to present more accurate land use, types of vegetation and urban infrastructure. Furthermore, deep learning models, especially convolutional neural networks (CNNs), have achieved significant success for image recognition, bringing crucial opportunities to harvest remote sensing imagery at a finer granularity and improve the quality of information delivered by satellites systems.

Big data analytics and AI have further advanced satellite information systems. Satellites produce terabytes of data each day [5]. Decision-makers need to process this data in real-time. AI algorithms, especially those for natural language processing and predictive analytics, search huge datasets. They reveal findings that would be impossible to uncover otherwise [6].

Figure 1 presents the block diagram of our proposed method including the following four major stages:

1) Data Input, 2) Data Preparation, 3) Deep Learning.

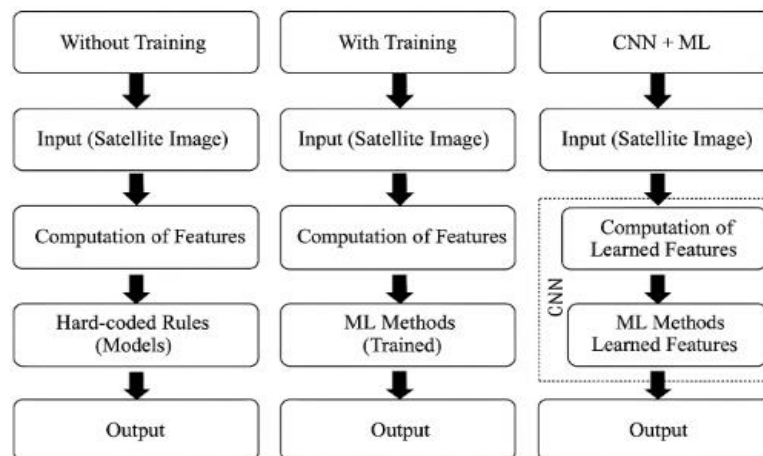


**Figure 1.** Block diagram of our proposed method

Each stage is designed with a distinct purpose to support accurate multispectral image reconstruction and to ensure the effectiveness of subsequent analysis tasks.

Stage 1: Data Input - In this stage, data relevant to the study area are collected. These include:

- Multispectral images from the Landsat or Sentinel-2 satellites, offering 8-12 spectral bands across visible to short-wave infrared ranges.
- The Corine Land Cover (CLC) dataset serves as ground truth for evaluating classification performance.

Stage 2: Data Preparation - Sentinel-2 images and the CLC map are resampled and warped to achieve similar resolution and spatial coverage.

Once the Sentinel-2 data are aligned, a 12-band multispectral image is constructed from these spectral bands.

From this multispectral image, fixed-size patches of  $224 \times 224 \times 12$  pixels are generated for:

- Fitting and testing the deep neural network,
- Building a spectral dictionary to represent the features.

Deep Learning - DeepLabv3+ is a state-of-the-art model for semantic segmentation. It is highly efficient in complex visual environments, including satellite and multispectral imagery. The method captures high-level semantic information while retaining spatial accuracy and consolidates several advanced components to enhance segmentation performance.

DeepLabv3+ uses ResNet-50 to extract advanced features, achieving greater robustness [7]. It then adopts two core modules:

1) the Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP) module, which captures multi-scale context effectively;

2) the Decoder module, which refines object boundaries by using skip connections.

Atrous Spatial Pyramid Pooling (ASPP): We employ the ASPP module to obtain fixed-size image-level features. This module efficiently captures objects at multiple scales. The lightweight decoder enhances object boundaries and restores spatial details lost during downsampling [6,7].

Shortcut connections also help preserve low-level features, which are critical for accurate segmentation. Combined, these innovations aim to address major challenges in multispectral satellite image processing, such as:

- ✓ Scale variation of terrestrial features,
- ✓ Spectral complexity across multiple bands,
- ✓ Environmental variations, including illumination, vegetation phenology and atmospheric factors.

DeepLabv3+ effectively handles the special properties of multispectral data. It produces highly accurate segmentation results and is a strong candidate for land cover mapping and Earth surface classification applications.

To improve generalisation under varying conditions, we use training samples from images taken in all four seasons. The decision matrix weights and dictionary elements are automatically learned and adapt to various vegetation types, lighting conditions, and atmospheric parameters. This enhances both robustness and classification accuracy across all seasons.

**Post-processing and Classification.** Reconstructed multispectral images are input to classifiers, which evaluate their goodness of fit using predicted land cover classes and the reference map from CLC 2018. This process verifies the quality and usefulness of the reconstructed spectral description.

Following the evaluation of goodness of fit, this paper employs SVMs with spatial-spectral features for satellite image classification. The proposed method involves preprocessing of raw images, extraction of spatial and contextual texture features, and the application of SVMs with suitable kernel functions, such as radial basis functions, to classify various land cover types in a high-dimensional feature space.

Dimensionality reduction methods, such as PCA, are used for feature selection. By combining spectral and spatial features, the SVM effectively differentiates complex land cover types, such as urban infrastructure and plant zones.

Figure 2 presents the block diagram of intelligent organization of satellite information:

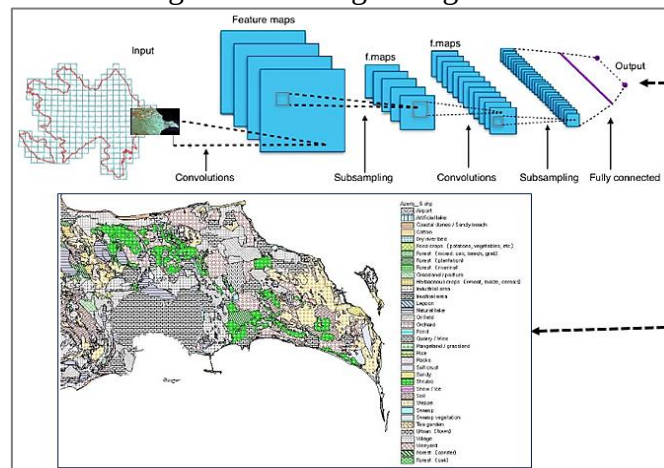


**Figure 2.** Intelligent organization of satellite information



**Results and discussion.** Experimental results demonstrate that the SVM-based model delivers strong classification performance, with overall accuracy, precision, recall, and F1-score for the test set at 89%, 88%, 91%, and 91%, respectively [8]. These metrics confirm the model's robustness, especially under varying environmental conditions. Notably, SVMs excel in separating classes with spectral overlaps by integrating spatial features. The system's practical value extends to applications such as deforestation monitoring, urban expansion, and precision agriculture, supporting decision-making in geographic information systems (GIS).

**Conclusions.** In summary, the application of pattern recognition within satellite information systems is reshaping how data from space is managed and utilised. Satellite information systems, enhanced by these technologies, are now pivotal for objectives such as environmental monitoring and urban planning. Integrating pattern recognition leads directly to improved accuracy, efficiency, and real-time decision-making.

Pattern recognition dramatically expands the applications and impact of satellite information systems. Emerging technologies, including Machine Learning, Artificial Intelligence, and Big Data analytics, are further strengthening satellite data processing and analysis. As these tools advance, even greater capabilities are expected.

## References

1. Ibrahimova, S. R. (2024). Methods for intelligently organising global satellite data processing. *75th International Astronautical Congress*, Milan, Italy.
2. Fan, G. (2025). *Internet of Satellites (IoS) for intelligent satellite clusters*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209580992500493X>
3. Chintalapati, B. (2024). *Opportunities and challenges of on-board AI-based image processing in Earth observation satellites*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117724002886>
4. Fourati, F. (2021). *Artificial intelligence for satellite communication: A review*. <https://arxiv.org/pdf/2101.10899>
5. Averkin, A. (2022). *Overview of satellite image recognition models*. <https://arxiv.org/abs/2212.03716>
6. Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. A. (2019). *Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>
7. Zhang, Y., & Zhang, L. (2018). *Deep learning for remote sensing image classification: A survey*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 8(6), e1264. <https://doi.org/10.1002/widm.1264>
8. Jakkani, A. K. (2024). *An analysis on intelligent systems for remote sensing satellite image processing and classification*. *Journal of Image Processing and Intelligent Remote Sensing*, 4 (4), 30–40. <https://doi.org/10.55529/jipirs.44.30.40>

## PEYK İNFORMASIYA SİSTEMLƏRİNİN OBRAZLARIN TANINMASI TEKNOLOGİYASI ƏSASINDA İNTELLEKTUAL TƏŞKİLİ

Ibrahimova S.R.

**Xülasə.** Peyk informasiya sistemlərinin obrazların tanınması texnologiyası vasitəsilə intellektual təşkili - aerokosmik məlumatların toplanması, emalı, təhlili və onlar üzərindən informasiyanın dəqiq tanınmasına əsas verir. Təqdim olunan məqalədə obrazların tanınması

*sisteminin AI sisteminə integrasiyası ilə maşın öyrənməsi, dərin neyron şəbəkələri və mürəkkəb xüsusiyyətlərin təyini üsullarına əsaslanan süni intellekt texnologiyalarının tətbiqində yeni bir yanaşma təqdim edilir.*

*Bu texnologiyaların integrasiyası, sistemin effektiv fəaliyyətini artırmaqla yanaşı, həm də real vaxt rejimində daha dəqiq qərarvermə prosesini dəstəkləyir.*

**Açar sözlər:** *süni intellekt, obrazların tanınması, məsafədən zondlama, peyk təsvirlərinin sinifləndirilməsi, məkan-spektral xüsusiyyətlər, dərin öyrənmə*

## AVIASİYADA BİZNES PROSESLƏRİN AVTOMATLAŞDIRILMASI



**Əsgərov T.K.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
tasgarov@naa.edu.az

**Xülasə.** Məruzədə “Sənaye 4.0” platformasına əsaslanan biznes proseslərinin avtomatlaşdırılması məsələsinin həllinə baxılır. Burada müasir texnologiyaların o cümlədən, süni intellektin, əşyaların İnternetinin, böyük verilənlərin və kiber-fiziki sistemlərinin biznes proseslərinə təsiri şərh olunur. Ələlxüsus aviasiya sahəsində biznes proseslərinin konseptual strukturu və onların avtomatlaşdırılmasında istifadə edilən rəqəmsal texnologiyalar (alətlər) araşdırılır. Rəqəmsal texnologiyaların tətbiqi aviasiya sənayesində əməliyyatların səmərəliliyini artırmaq, resursları daha yaxşı idarə etmək və əməliyyat xərclərini azaltmaq məqsədini daşıyır. Xülasə etibarilə əldə olunan nəticələr ümumiləşdirilərək, aviasiyada rəqəmsal transformasiyanın və biznes əlaqələrinin həyata keçirilməsində mühüm rol oynayacaq.

**Açar sözlər:** sənaye 4.0, biznes prosesi, aviasiya, süni intellekt, rəqəmsal alət, rəqəmsal əkiz

**Giriş.** “Sənaye 4.0” platforması - müasir texnologiyaların integrasiyası ilə iqtisadiyyatın bütün sahələrində ciddi struktur dəyişikliyinə səbəb olmuşdur. Digər sənaye inqilablarından fərqli olaraq, “Sənaye 4.0” əsasən süni intellekt, əşyaların İnterneti, böyük verilənlər, kibertəhlükəsizlik, bulud texnologiyaları və rəqəmsal əkiz kimi yeni texnoloji konseptlərə əsaslanır. Bu cür yanaşma üsulu müəssisə və təşkilatların yalnız texniki göstəricilərini deyil, eyni zamanda biznes proseslərinin idarə olunmasında köklü şəkildə dinamika yaradır.

Biznes prosesi – təşkilat daxilində keyfiyyət göstəricilərinin yaxşılaşdırılmasına yönəldilmiş, ardıcıl və əlaqəli fəaliyyətlər silsiləsidir. Bu fəaliyyət növləri bir sıra resursların istifadəsini tələb etməklə yanaşı müştərilərə səmərəli xidmət (və ya məhsul) təqdim edir. Ənənəvi biznes proseslərinə əl əməyi, sənəd dövriyyəsi və çevik olmayan qərar qəbulətmə mexanizmləri aid edilir. Müasir dövrdə bu proseslər intellektual və çevik sistemlərlə əsaslanır. Burada qərar qəbulətmə mexanizmləri rəqəmsal transformasiyalata və real vaxt rejiminə (onlayn) əsaslanır.

Rəqəmsal transformasiyalar - yüksək təhlükəsizlik tələb edən sahələrdə, məsələn aviasiya sənayesində, daha da böyük əhəmiyyət kəsb edir. Hal-hazırda bu sənaye (mülki, kommersiya-yönlü) – çoxşaxəli biznes prosesləri ilə xarakterizə olunur. Bu aviasiya sahəsində hər bir biznes prosesinin yüksək dəqiqliklə həyata keçirilməsi aviasiya təhlükəsizliyi üçün mühüm amildir. Bu proseslərə uçuşların planlaşdırılması, texniki xidmətlərin təşkili, sərnişin və yük daşımaları, biletlərin bronlaşdırılması, hava limanı əməliyyatları və müştəri xidmətləri daxildir.

Qeyd edildiyi kimi aviasiya sahəsində biznes proseslərinin avtomatlaşdırılması “Sənaye 4.0” platformasının komponentləri ilə daha da aktuallaşır. Belə ki, süni intellektlə quraşdırılmış cihazlar (qurğular) texniki nasazlıqları proqnozlaşdırmaqla bilir. Real zaman nüddətdində IoT qurğuları mütamadi olaraq məzarəti (monitorinqi) həyata keçirir. Rəqəmsal platformalar insanlar və sistemlər arasında verilənlər mübadiləsini təmin edir və vahid idarəetmə sistemi formalaşdırılır. Məsələn, təyyarəyə texniki nəzarət zamanı yalnız avioniklərin vizual yoxlamaları ilə deyil, sensorlardan alınan verilənlərin analitikası ilə idarə olunur. Bilet satış sistemləri - süni intellektə əsaslanan dinamik qiymətləndirmə mexanizmləri ilə həyata keçirilir. Aviasiyada biznes proseslərinin avtomatlaşdırılması yalnız texnoloji həll kimi deyil, həm də idarəetmə, kadr hazırlığı, hüquqi və iqtisadi məsələlər baxımından da kompleks yanaşma tələb edir.

Biznes prosesin tərkibi və konseptual strukturu. Aviasiyada biznes proseslərinin təşkili yalnız texniki əməliyyatlarla məhdudlaşmır. Ümumiyyətlə, biznes prosesləri yüksək koordinasiya və çoxşaxəli xarakter daşıyır. Buraya biznes proseslərinin strukturu 3 əsas kateqoriyaya bölünür: strateji, əsas və köməkçi proseslər. Biznes proseslərin kateqoriyalar üzrə təsnifatı Cədvəl 1-də göstərilmişdir. Strateji proseslər uzunmüddətli məqsədləri və inkişaf istiqamətlərini müəyyən edir. Əsas proseslər şirkətin əsas dəyər formalaşdırıcı fəaliyyətlərini əhatə edir. Əsas proseslər birbaşa müştəri ehtiyaclarının qarşılanmasına yönəldilir. Köməkçi proseslər əsas əməliyyatların səmərəli işləməsinə təmin edən müəssisə daxili funksiyaları özündə ehtiva edir.

Cədvəl 2  
Biznes proseslərin kateqoriyalar üzrə təsnifatı

| Kateqoriyalar      | Biznes prosesləri                                                                                             |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Strateji proseslər | planlaşdırma, riskləri idarə olunması, tənzimləyici qurumlarla əlaqələrin təşkili (məsələn, ICAO, IATA və s.) |
| Əsas proseslər     | uçuş əməliyyatları, sərnişinlərə xidmət, texniki xidmət və nəzarət, logistika                                 |
| Köməkçi proseslər  | İnsan resurslarının idarə olunması, IT dəstək, maliyyə və hüquq                                               |

Aviasiyada biznes prosesləri bir çox hallardan funksional xarakter daşıyır və bu proseslər əsaslı idarəetmə modelinə uyğun qurulur. Bu isə o deməkdir ki, qiymətləndirmə əsasında proseslər arasında koordinasiya və inteqrasiya əsas rol oynayır. Məsələn, hər hansı bir uçuşun həyata keçirilməsi üçün aşağıdakı bölmələrin birgə fəaliyyəti inteqrasiya olunmalıdır:

- planlaşdırma bölməsi – uçuş üçün hərəkət cədvəllərini hazırlayır;
- ekipajın idarə olunması – uçuş heyətini müəyyənləşdirir;
- texniki xidmət – təyyarələrin uçuşa yararlı olub-olmamasını yoxlayır;
- sərnişinlərə xidmət – biletlərin satışını və qeydiyyatını həyata keçirir;
- yerüsü xidmət bölmələri – baqaj və sərnişinlərin hərəkət istiqamətlərinə kömək edir.

İnteqrasiya baxımından hər bir prosesin idarə olunması real vaxt miqyasında informasiya sistemləri ilə əlaqələndirilməlidir. Əks halda, baş verən kiçik bir nasazlıq bütün sistemin işinə təsir göstərə bilər. Məsələn, biznes proseslərinin modelləşdirilməsi üçün istifadə olunan Renaissance CS SAM sistemi - 1400-dən çox prosesin və biznes-proseslər haqqında biliklər repozitorisi (anbarı) ilə birlikdə istifadə olunur. Sistem aşağıdakı əsas məsələləri həll edir:

- biznes proseslər üzrə plan-normativ verilənlərin hazırlanmasına dəstək vermək, həmin verilənləri verilənlər bazalarında (verilənlər anbarlarında) saxlamaq və biznes-proseslərin istifadəçilərinə təqdim etmək;

- biznes proseslərin nəticələrini qeyd etmək və istifadəçilərə analitik informasiyanı (məsələn, plan və faktiki göstəricilərin müqayisəsi) təqdim etmək.

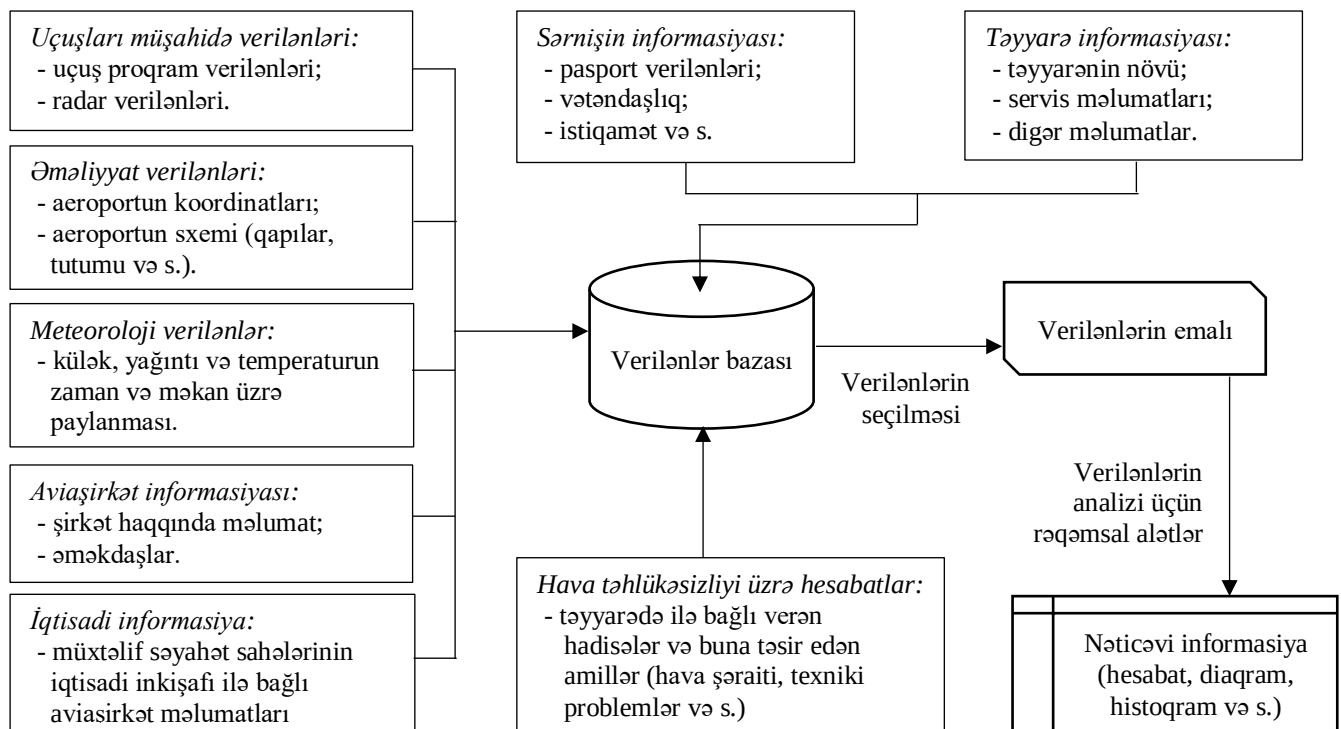
Bütün sənaye növlərində olduğu kimi aviadaşıma sənayesi də böyük həcmli verilənlər (big data) əmələ gətirir. Bu verilənlər aviaşirkətlər üçün həm bir imkan, həm də eyni zamanda bir çağırış rolunu oynayır. Aviasiyada böyük həcmli verilənlərin toplanması və bu verilənlərin rəqəmsal alətlər vasitəsilə emalı nəticəsində menecerlərə və qərar qəbul edəş şəxslərə operativ informasiya çatdırılır. Belə ki, aviadaşıyıcılar, hava limanları, təyyarə istehsalçıları və s. bu kimi təchizatçılar, əməliyyatların planlaşdırılması və həyata keçirilməsi üçün dəqiq və keyfiyyətli informasiyaya malik olmalıdır. Kompleks və paralel verilənlər dəstləri əsasında aviasiyaya aid VB-lərdə verilənlərin toplanması, çeşidlənməsi və təhlili məsələləri aktual xarakter daşıyır.

Aviasiya verilənləri böyük həcmli dinamika üzrə genişlənir. Bu verilənlər davamlı olaraq yenilənir və müxtəlif formatlara malik olur. Bu da onların böyük verilənlər xüsusiyyətlərinə uyğun olduğunu göstərir. [1]-də qeyd olunur ki, aviasiya sənayesindən gələn böyük verilənlər bir neçə

mənbəyə malik ola bilər. Buraya - uçuş verilənləri, sərnəşin verilənləri, hava limanı əməliyyatları, təyyarə məlumatları, hava şəraiti məlumatları, aviaşirkət məlumatları və s. aiddir.

Şəkil 1-də aviasiya sənayesi üçün verilənlər mənbələri və emalının konseptual strukturu göstərilmişdir. Şəkildən görünür ki, aviasiya biznes prosesində müxtəlif mənbələrdən daxil olan verilənlər, rəqəmsal alətlər vasitəsilə təhlil edilmədən əvvəl böyük verilənlər anbarına integrasiya edilir [2,3]. Qeyd etmək lazımdır ki, əvvəlcə qeyd olunan informasiya mənbələri bir-biri əlaqələndirilsə də, heç biri müstəqil şəkildə aviasiya sənayesi haqqında qlobal bir mənzərə yarada bilməz. Bu səbəbdən, mövcud verilənləri əlaqəli şəkildə istifadə etməklə aviaşirkətlərin menecerləri üçün etibarlı və faydalı hesabatlar əldə etmək mümkündür.

**Biznes proseslərinin avtomatlaşdırılması üçün rəqəmsal alətlər.** Ümumiyyətlə, biznes proseslərinin avtomatlaşdırılması üçün müxtəlif rəqəmsal alətlər mövcuddur. Bu alətlərdən istifadə etməklə şirkətlər daha səmərəli işləyir və eyni zamanda, vaxta və digər resurslara qənaət etməyə kömək edir. Həmçinin, verilənlərin düzgün və ardıcıl şəkildə idarə olunmasını təmin edir, məhsuldarlığı artırır və qərar qəbul etmə prosesini sadələşdirir. Belə platformalarda tətbiq olunan əsas rəqəmsal alətlərə - süni intellekt həlləri (artificial intelligence solutions), əşyaların İnterneti (Internet of Things, IoT), ERP (Enterprise Resource Planning) sistemlər, rəqəmsal əkizlər (digital twins) və rəqəmsal iş axınları (digital workflow) aiddir.



**Şəkil 1.** Aviasiya sənayesində biznes proseslərin avtomatlaşdırılmasının konseptual strukturu

Süni intellekt həlləri - müxtəlif aspektlərində böyük dəyişikliklərə səbəb olaraq, həm əməliyyatların səmərəliliyini artırır, həm də müştəri təcrübəsini yaxşılaşdırır. Süni intellektin tətbiqi təyyarə qəzalarının qarşısını almaqdan tutmuş, uçuşların optimallaşdırılmasına və müştəri xidmətlərinin avtomatlaşdırılmasına qədər geniş sahələri əhatə edir. Süni intellektə əsaslanan sistemlər böyük həcmli verilənləri generasiya edir, onların dəqiq emalını və analizini yerinə yetirir. Süni intellekt proqnozlaşdırma modelləri əsasında sənayenin fəaliyyətinin gələcək dinamikasını əks etdirir [4,5].

Əşyaların İnterneti - təyyarələr, hava limanları və digər aviasiya infrastrukturuları arasındakı əlaqələri daha səmərəli və ağıllı edir. IoT cihazları, təyyarənin mühərrikinin vəziyyətini, yük və



sərnişin informasiysını onlayn rejimdə minitorinqini təmin edir. Hava limanlarında IoT sensorlar vasitəsilə sərnişin axınlarını izlənilir və sıxlıqlarla bağlı məlumatlar sərnişinlərə çatdırılır.

ERP sistemləri - hava yolları şirkətlərinin və hava limanlarının müxtəlif iş proseslərini birləşdirir. Əməliyyatları optimal və koordinasiyalı şəkildə idarə edir. Bu sistemlər maliyyə, resursların (təyyarələr, personal, avadanlıq) planlaşdırılması, təyyarəyə nəzarət və müştəri xidmətlərinə dair verilənlərin mərkəzləşdirilməsini təmin edir.

Rəqəmsal əkizlər - təyyarələr, mühərriklər, avadanlıqlar və hətta hava limanları üçün onlayn rejimdə verilənləri toplayaraq onların virtual rəqəmsal modelini (surətini) yaradır. Ümumiyyətlə, bu texnologiya, fiziki obyektlərin davranışlarını imitə edərək onu analiz etməyə və optimallaşdırmağa imkan verir. Aviasiyada rəqəmsal əkizlər, təyyarələrin vəziyyətini və fəaliyyətini izlənməsi üçün istifadə olunur və nasazlıqları əvvəlcədən proqnozlaşdırır. Təhlükəsiz və səmərəli əməliyyatlar həyata keçirmək məqsədi daşıyır [6].

*Rəqəmsal iş axınları* - təyyarə əməliyyatlarının, hava limanlarının və müştəri xidmətlərinin daha sürətli və səmərəli şəkildə idarə olunması üçün istifadə olunur. Bu iş axınları, müxtəlif biznes proseslərini (məsələn, sərnişin qeydiyyatı, bilet satışı, təhlükəsizlik yoxlamaları və s.) avtomatlaşdıraraq məhsuldarlığı artırır.

**Nəticə.** “Sənaye 4.0” platformasının tətbiqi ilə biznes proseslərinin avtomatlaşdırılması, aviasiya sənayenin səmərəliliyini və təhlükəsizliyini artırmaq üçün mütləq addımdır. Bu kontekstdə rəqəmsal texnologiyalar və sistemlər vasitəsilə aviaşirkətlər və hava limanları əməliyyatları daha sürətli və səmərəli şəkildə həyata keçirir. İstər uçuşların planlaşdırılması, istərsə də təyyarələrə təhlükəsizlik yoxlamaları və müştəri xidmətlərində insan səhvlərini minimuma endirir, resurslardan səmərəli istifadəni təmin edir və əməliyyat xərclərini aşağı salır. Məruzədə aviasiya sənayesində biznes proseslərin avtomatlaşdırılmasının həyata keçirmə üçün konseptual struktur təklif edilmişdir və biznes proseslərin avtomatlaşdırılması üçün rəqəmsal alətlər haqqında müfəssəl məlumatlar verilmişdir. Göstərilmişdir ki, süni intellekt, rəqəmsal əkiz və IoT kimi qabaqcıl texnologiyaların tətbiqi ilə aviasiya sənayesində biznes proseslərini daha da təkmilləşdirəcək.

### Ədəbiyyat

1. Əsgərov, T. (2022). Kiber-fiziki sistemlərin təkamülü. *Sumqayıt Dövlət Universitetinin konfrans materialları* (pp.269-271). Bakı, Azərbaycan: SDU nəşriyyatı.
2. Əsgərov, T., Rəhimova, N., Abdullayev, V. (2022). “Sənaye 4.0” platforması əsasında kiber-fiziki sistemlərin struktur layihələndirilməsi. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*. 14(3), 87-96.  
[www.ama.com.az/wp-content/uploads/2022/11/14-N3-23-sent-2022.pdf#page=49](http://www.ama.com.az/wp-content/uploads/2022/11/14-N3-23-sent-2022.pdf#page=49)
3. Asgarov, T., Ragimova, N., Gadirova, E. (2025). Smart Energy Management Systems. In IGI Global (Ed.), *Revolutionizing AI and Robotics in the Oil and Gas Industry*, (pp. 353-376).  
<https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8156-4.ch017>
4. Askerov, T., Abdullayev, V., Abuzarova, V., Niu, Y., Singh, K. (2024). Data processing in internet of things networks. *Seminars in Medical Writing and Education*. Vol 3, 1-9.  
<https://doi.org/10.56294/mw2024.595>
5. Larsen T. (2013). Cross-platform aviation analytics using big-data methods. *Integrated Communications navigation and surveillance conference*. Herndon, USA.  
<https://doi.org/10.1109/ICNSurv.2013.6548579>

6. Naoufel Boulila (2019). *Cyber-Physical Systems and Industry 4.0: Properties, Structure, Communication, and Behavior*. Research and Development for Digitalization and Automation: Siemens AG Press.  
[https://www.researchgate.net/publication/332420221\\_Cyber-Physical\\_Systems\\_and\\_Industry\\_40\\_Properties\\_Structure\\_Communication\\_and\\_Behavior](https://www.researchgate.net/publication/332420221_Cyber-Physical_Systems_and_Industry_40_Properties_Structure_Communication_and_Behavior)

## AUTOMATION OF BUSINESS PROCESSES IN AVIATION

Asgarov T.K.

**Abstract.** *The report addresses the issue of automating business processes based on the "Industry 4.0" platform. It discusses the impact of modern technologies, including artificial intelligence, the Internet of Things, big data, and cyber-physical systems on business processes. Specifically, it examines the conceptual structure of business processes in the aviation sector and the digital technologies (tools) used for their automation. The application of digital technologies aims to improve operational efficiency in the aviation industry, optimize resource management, and reduce operational costs. In summary, the results obtained are generalized and will play an important role in the implementation of digital transformation and business relationships in aviation.*

**Keywords:** *industry 4.0, business process, aviation, artificial intelligence, digital tool, digital twin*

## KİBER-FİZİKİ SİSTEMLƏRİN TEXNİKİ VƏZİYYƏTİNİN MONİTORİNGİNDƏ, DİAQNOSTİKASINDA VƏ İDENTİFİKASIYASINDA SÜNİ İNTELLEKT TEXNOLOGİYALARININ TƏTBİQİ



**Quluyev Q.A.**

AR ETN İdarəetmə Sistemləri İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
quluyevqambar@gmail.com



**Paşayev F.H.**

AR ETN İdarəetmə Sistemləri İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
pasha.farhad@gmail.com



**Paşayev İ.F.**

AR ETN İdarəetmə Sistemləri İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
pashayev.ilkin@gmail.com



**Cəfərov C.M.**

AR ETN İdarəetmə Sistemləri İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
cahangirceferov@yahoo.com

**Xülasə.** Məlum olduğu kimi kiber-fiziki sistemlər texnoloji informasiya konsepsiyaları əsasında yaradılır. Bu sistemlərdə hesablama resurları və fiziki varlıqlar integrasiya olunmuş şəkildədir. Sistemdə istifadə edilən fiziki varlıq dedikdə istənilən texniki obyekt, texnoloji proses, hətta bioloji obyektlər başa düşülür. Kiberfiziki sistemlərdə hesablama komponentləri fiziki sistem içərisində paylanmış şəkildə yerləşdirilir və onu təşkil edən texniki elementlərlə sinergetik olaraq əlaqədar olur.

Kiber-fiziki sistemlər ən müasir proqram texniki vasitələrin tətbiqi ilə yaradılır. Bu sistemlər elmin, texnikanın, istehsalatın mühüm sahələrində ciddi məsələlərin həlli üçün yaradılır. Bu sistemlərin yaradılmasında elmi texniki innovativ yeniliklərdən və yeni informasiya texnologiyalarından istifadə edilir. Kiberfiziki sistemlərin yaradılmasının əsasında böyük verilənlərin analitikası, süni intellekt texnologiyaları, bulud texnologiyaları və kvant hesablamaları kimi texnologiyalardan istifadə edilir.

Kiber-fiziki sistemlərin geniş tətbiq sahələri vardır və bu sahələrin siyahısına getdikcə yeniləri əlavə edilməkdədir. Buraya avtonom sənaye robotlarının yaradılması, avtonom nəqliyyat vasitələrinin və pilotsuz uçuş aparatlarının yaradılması, əşyaların interneti, sensor şəbəkələrinin yaradılması və s. daxildir.

*Kiber-fiziki sistemlərin layihələndirilməsi prosesində sistemin proqram texniki vasitələri, sistemin monitorinqini və diaqnostikasını həyata keçirməyə imkan verən informativ əlamətlər vektorunu yaratmaq üçün hibrid şəkildə tətbiq edilə bilən texnologiyalar, qərar qəbul etmə prosesini təmin edən süni intellekt texnologiyaları təyin edilməlidir. Tətbiq edilən texnologiyalar sensorlardan məlumat qəbulu tezliyi, məlumatın həcmi kimi rejim parametrlərinin təyin edilməsini şərtləndirir. İnformativ əlamətlər elə yaradılmalıdırlar ki, əlamətlərin sayı minimum olsun, kəşimə halları azaldılsın. İnformativ əlamətlər vektoru yaradılarkən sistemin istismar heyətinin təəssüratlarının, sistemin texniki vəziyyətini qiymətləndirən ekspertlərin fikirlərinin rəqəmsal analoqlarının yaradılması və vektora əlavə edilməsi qərar qəbul etmə prosesinin adekvatlığını artırma bilər. Rəqəmsallaşdırma prosesində qeyri səlis məntiq texnologiyalarından istifadə edilə bilər.*

*Kiberfiziki sistemin texniki vəziyyətini qiymətləndirmək üçün süni intellekt texnologiyalarından neyron şəbəkələr tətbiq edilən hallarda istismar heyətinin və ekspertlərin rəqəmsallaşdırılmış qiymətləri neyron şəbəkələrin həm girişlərində, həm də çıxışlarında istifadə edilməklə öyrətmə prosesini təmin edə bilər.*

**Açar sözlər:** *kiberfiziki sistemlər, hesablama resursları, fiziki varlıqlar, böyük verilənlər, süni intellekt, avtonom robotlar, pilotsuz uçuş aparatları, neyron şəbəkələr.*

**Giriş.** Məlum olduğu kimi Kiberfiziki sistemlər elə texnoloji informasiya konsepsiyasıdır ki, burada hesablama resursları və fiziki varlıqlar inteqrasiya olunmuş şəkildə təsəvvür edilir [1,2]. Bu zaman fiziki varlıq dedikdə istənilən texniki, bioloji obyektlər başa düşülür [3]. Kiberfiziki sistemlərdə hesablama komponentləri fiziki sistem içərisində paylanır və onu təşkil edən elementlərlə sinergetik olaraq əlaqədar olur [4].

Yarandığı ilk günlərdən başlayaraq kiberfiziki sistemlərin əsasında aparıcı texnoloji yeniliklər dayanır. Belə əsas texnologiyalardan bəzilərini göstərmək olar:

- Böyük verilənlərin analitikası – müxtəlif mənbələrdən məlumatların toplanması, sistemli analizi və hərtərəfli qiymətləndirilməsi real vaxt rejimində qərar qəbul edilməsi üçün standartla çevrilmişdir;
- Süni intellekt – maşın təlimi keçmiş xüsusi süni intellektin tətbiqi avtomatlaşdırılmış sistemlərdə kütləvi istifadəsinə başlanmışdır. Artıq bu gün süni intellekt kompüter görməsi, avtomatlaşdırılmış virtual köməkçilərin yaradılmasında, proqramlaşdırma prosesinin avtomatlaşdırılmasında, nitqin tanınması məsələlərinin həllində, maşın tərcüməsi sistemlərində və s. tətbiq edilir.
- Avtonom robotlar – avtonom sənaye robotları olduqca mürəkkəb əməliyyatları yerinə yetirmək qabiliyyətinə malikdirlər. Kompüter görmə sistemlərinin bu robotlarda tətbiqi imkan verir ki, robotlar bir-biri ilə əlaqədə ola bilsinlər, insanlara təhlükə yaratmadan onlarla birlikdə fəaliyyət göstərsinlər. Robotlarla yanaşı olan insanlar onların hərəkətini korrekt edə bilər və yaxından idarə edə bilər. Bununla yanaşı belə robotlar insan həyatı üçün təhlükəli olan istehsalat mühitində faydalı ola bilər;
- Avtonom nəqliyyat vasitələri və Pilotsuz Uçuş Aparatları (PUA) – bunlar müxtəlif avtonomiyaya malik olmaqla müstəqil idarə etmə sistemləri əsasında yaradılmış qismən məsafədən və ya tamamilə müstəqil olaraq özü-özünə idarə edən sistemlərdir. Avtonom nəqliyyat vasitələrinin əsas funksiyası sərnişinləri və yükləri daşımaqdan ibarətdir. PUA-lar isə kəşfiyyat və videomüşahidə yerinə yetirə bilirlər. Kənd təsərrüfatında, tibbdə, hərbi məqsədlər üçün və s. istifadə edilə bilərlər.
- Bulud texnologiyaları və kvant hesablamaları – bəzi hallarda əraziyə görə paylanmış istifadəçilər arasında qarşılıqlı işi təmin edir və maşın öyrətmə proseslərinin sürətinin dəfələrlə artırılmasını, modellərin adekvatlığını təmin edir.

Məqalədə kiber-fiziki sistemlərdə süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi üçün zəruri olan bilik və bacarıqlar analiz edilmişdir.

**Kiber-fiziki sistemlərin texniki vəziyyətinin monitorinqində, diaqnostikasında və identifikasiyasında süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi üçün zəruri olan bilik və bacarıqlar.** İlk növbədə kiber-fiziki sistemin analizi nəticəsində monitorinq və diaqnostika funksiyalarını həyata keçirmək üçün məlumatların əldə edilməsini təmin edən, uzun müddət permonent istifadə edilə bilən ilkin çeviricilərin, obyekt kontrollerlərinin seçilməsini göstərmək olar. Eyni zamanda çeviricilərin və kontrollerlərin tətbiq sahələrinin və nöqtələrinin təyin edilməsi, məlumatların etibarlı qəbulunun həyata keçirilməsi olduqca əhəmiyyətlidir. Qəbul edilmiş siqnalın işlənməsini, kiber-fiziki sistemin texniki vəziyyətini adekvat inikas etdirə bilən informativ əlamətlərin yaradılmasını təmin edə bilən texnologiyaların, alqoritmlərin, proqram vasitələrinin yaradılması və tətbiqi süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi üçün əsaslar yaradır [5,6]. Bu məsələlərin həlli sistemin layihələndirmə mərhələsində həyata keçirilməlidir. Seçilmiş və tətbiq edilən texnologiyalar məlumatların qəbulu rejimlərinin üzərinə müəyyən tələblər qoyur. Buraya məlumatların qəbul edilməsi tezliyi, hər bir seansın uzunluğu, qəbul edilmiş məlumatların həcmi və s. aiddir.

İnformativ əlamətlər vektorunun yaradılması üçün spektral analiz, korrelyasiya analizi, veyvlet analizi, küy texnologiyalarından hibrid şəkildə istifadə edilə bilər [3]. Spektral analiz vasitəsi ilə siqnalın tezlik komponentləri, veyvlet analiz vasitəsi ilə siqnalın zamana görə dəyişməsinin dinamikası müəyyən edilə bilər. Küy texnologiyalarının tətbiqi ilə siqnalın tərkibində olan, obyektin texniki vəziyyətində ilkin dəyişiklikləri əks etdirən küylərin bəzi xarakteristikaları təyin edilə bilər. Bu xarakteristikalar hesablanarkən küyü siqnalıdan ayırmaq zərurəti yaranmır.

Kiberfiziki sistemin ekspertlər tərəfindən qiymətləndirilməsi vasitəsi ilə və istismar heyətinin sistem haqqında olan təəssüratlarının analizi vasitəsi ilə informativ əlamətlər vektorunu gücləndirmək olar [6].

### Ədəbiyyat

1. Абу-Абед Ф.Н. (2022) Киберфизические системы и человек в контексте интеллектуального производства Индустрии 4.0. Экономика и управление инновациями.3, 78-87.
2. Я.Г. Горбачев, А.Е. Платунов, В.Ю. Пинкевич, М.В. Кольчурин. (2022) Киберфизические системы. Методы высокоуровневого проектирования. – СПб: Университет ИТМО.
3. Т. А. Алиев, Г. А. Гулуев, А. Г. Рзаев, Н. Э. Рзаева, Ф. Г.Пашаев, Р. М. Гадимов. (2023) Корреляционная экстремальная система контроля начала неисправностей оборудования нефтяных промыслов путем анализа их ваттметрограммы и динамограммы. Мехатроника, автоматизация, управления. 24(5), 249-259.
4. напряженно-деформированного состояния штанги глубинного насоса // IV Международная конференция «Нелокальные краевые задачи и родственные проблемы математической биологии, информатики и физики», .219-222.
5. Pashaev, F.G., Zeinalov, D.I. & Nadzhafov. (2024). G.T. Development of Software and Hardware to Protect Technological Processes from Cyber Threats. *Aut. Control Comp. Sci* 58, 1396–1405.
6. F. H. Pashayev, J. I. Zeinalov and H. T. Nadzhafov, (2025) Monitoring and security assessment of traffic in communication channels of technological corporate computer networks. *Electrica*, 25, 1-9.



## USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE MONITORING, DIAGNOSTICS, AND IDENTIFICATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

Guluyev G.A., Pashayev F.H., Pashayev I.F., Jafarov J.M.

**Abstract.** As we know, cyber-physical systems are based on technological information concepts. In these systems, software computing resources and physical elements are integrated. By physical components used in such systems we mean any technical object, technological process, or even biological object. In cyber-physical systems, software components are distributed within the physical system and interact synergistically with the technical elements that comprise it.

Cyber-physical systems are created using the latest software tools. These systems are designed to solve serious problems in the fields of science, technology, and industry. The creation of these systems involves the use of innovative scientific and technical innovations and new information technologies. The creation of cyber-physical systems is based on the use of such technologies as big data analytics, artificial intelligence technologies, cloud technologies, and quantum computing.

Cyber-physical systems have a wide range of applications, and new ones are constantly being added to this list. These include autonomous industrial robots, autonomous transport vehicles, unmanned aerial vehicles, the Internet of Things, sensor networks, etc.

In the process of designing cyber-physical systems, it is necessary to identify the hardware and software tools of the system, technologies that can be applied in a hybrid form to create a vector of informative features that enable the implementation of the system's monitoring and diagnostics, artificial intelligence technologies that ensure the decision-making process. The applied technologies require the determination of mode parameters such as the frequency of collection of data from sensors and the volume of information. Informative features should be created such that the number of features is minimal and the number of intersections is reduced. When creating a vector of informative features, creating digital analogues of the impressions of the system's operating personnel and the opinions of experts assessing the technical condition of the system and adding them to the vector can increase the adequacy of the decision-making process. Fuzzy logic technologies can be used in the digitization process.

In cases where artificial intelligence technologies such as neural networks are used for assessing the technical condition of a cyber-physical system, digitized estimates from operating personnel and experts can be used in the inputs and outputs of the neural networks to ensure the training process.

**Keywords:** cyber-physical systems, computing resources, physical elements, big data, artificial intelligence, autonomous robots, unmanned aerial vehicles, neural networks.

## СТРУКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ



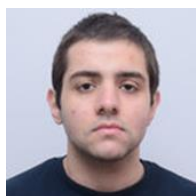
**Джавадов Н.Г.**

Национальное Аэрокосмическое Агентство, Баку, Азербайджан  
cavadov-natiq@mail.ru



**Амиров А.М.**

Национальное Аэрокосмическое Агентство, Баку, Азербайджан  
ali.amirov@mail.com



**Исмаилов В.М.**

Национальное Аэрокосмическое Агентство, Баку, Азербайджан  
ismailovvugar99@gmail.com

**Аннотация.** В условиях современного производства приоритетными задачами становятся снижение простоев, обеспечение качества производимой продукции, повышение надежности и снижение затрат на техническое обслуживание оборудования. В связи с этим, уделяется большое внимание интеграции искусственного интеллекта и машинного обучения в оптимизацию обслуживания технологического оборудования. Применение машинного обучения для анализа данных в режиме реального времени позволяет реализовать концепцию предиктивного обслуживания, которая в свою очередь лишена недостатков традиционных подходов. Для реализации концепции предиктивного обслуживания в данной статье предлагается аппаратно-программная архитектура с применением машинного обучения и облачных технологий.

Предлагаемая архитектура охватывает весь технологический цикл, необходимый для функционирования системы предиктивного обслуживания: от сбора данных с датчиков, расположенных на различных узлах оборудования до классификации состояния отслеживаемого элемента станка с последующим выводом на пользовательский веб-интерфейс.

Для реализации серверной части предлагается использование веб-фреймворка FastAPI, обеспечивающий высокую производительность и являющийся связующим элементом между модулем приема данных от микроконтроллера, препроцессором данных, моделью машинного обучения, базой данных для сохранения истории состояния оборудования и пользовательским интерфейсом на основе Streamlit.

Отличительной особенностью предлагаемой системы является низкая стоимость и высокая масштабируемость, что открывает возможности для широкой интеграции предложенной системы на малые и средние предприятия. Также предлагаемая архитектура подразумевает интеграцию в различные производственные условия и на различные типы металлорежущих станков. Модульность, предлагаемой архитектуры, позволяет расширять функциональность без необходимости полной переработки системы.

Таким образом, предложенное решение представляет собой технологически гибкую и экономически эффективную архитектуру для внедрения системы предиктивного обслуживания в реальные производственные процессы.

**Ключевые слова:** машинное обучение, умное производство, оптимизация обслуживания, большие данные, индустрия 4.0

**Введение.** Машинное обучение – это область компьютерных наук, в которой изучаются алгоритмы, позволяющие компьютеру обучаться решать задачи, для которых они не были предварительно запрограммированы [1]. В последние годы, ввиду развития вычислительных устройств и алгоритмов машинного обучения, проводятся исследования по внедрению интеллектуальных систем с алгоритмами машинного обучения в производство. Одним из задач подобных систем является мониторинг состояния технологического оборудования в режиме реального времени для своевременной замены неисправного элемента на ранних этапах его деградации. Данную концепцию также называют предиктивным обслуживанием [2]. Ранняя реакция на деградацию элементов оборудования позволяет уменьшить количество незапланированных простоев и предотвратить снижение качества обрабатываемых деталей. Концепция предиктивного обслуживания позволяет оптимизировать процесс обслуживания, которое проводится с учетом текущего состояния оборудования, в отличие от таких традиционных методологий, как реактивное и плановое обслуживание. Технический персонал на производстве получает информацию о текущем состоянии оборудования, и исходя из этого планирует замену неисправного компонента.

Обеспечение высокого уровня качества при обработке деталей также является важным показателем в производстве аэрокосмической техники. Соответственно, в последние годы в Национальном Аэрокосмическом Агентстве Азербайджана проводятся исследования по разработке алгоритмов машинного обучения для автоматической оценки состояния компонентов металлорежущего оборудования [3,4]. В результате проведенных работ, были разработаны различные модели для классификации состояния режущего инструмента для онлайн системы предиктивного обслуживания.

Однако, обученная модель является лишь одним из компонентов системы предиктивного обслуживания, показанная на Рисунке 1. Данная статья посвящена описанию архитектуры для системы предиктивного обслуживания металлорежущих станков с упором на масштабируемость и низкую стоимость. Предлагаемая архитектура представляет собой комплексное решение, которое затрагивает все этапы – от сбора данных с датчиков до вывода текущего состояния оборудования в пользовательском графическом интерфейсе.

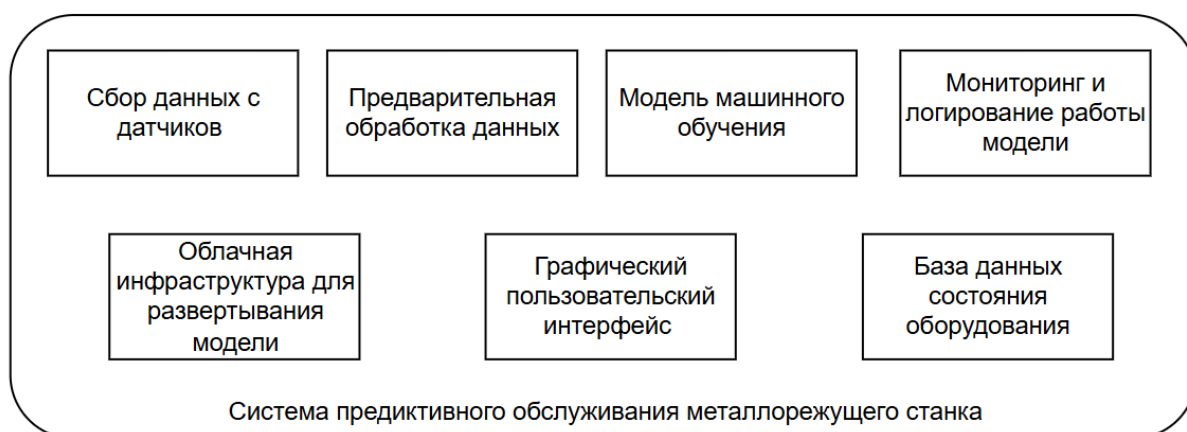


**Рисунок 1.** Компоненты, необходимые для функционирования системы предиктивного обслуживания металлорежущего станка.

**Описание разработанной архитектуры.** В рамках предлагаемой архитектуры источником данных служат датчики, установленные на станке, включая датчики вибрации, акустической эмиссии, акселерометры, тока шпинделя и др. Целью применения датчиков является обеспечение непрерывного сбора данных о текущем состоянии отслеживаемых частей станка. Объектами мониторинга могут быть, например, режущий инструмент и шпиндель.

Сигналы от датчиков передаются на микроконтроллер, где после первичной обработки, данные отправляются на облачный сервер по беспроводной связи.

Серверная часть является ключевой связывающей между физическими датчиками, моделью машинного обучения, базой данных и графическим интерфейсом. Реализация серверной части предлагается с помощью веб-фреймворка FastAPI для языка программирования Python. На сервере происходит обработка сигналов перед их отправкой на вход в заранее обученную модель. После чего модель возвращает результат в виде текущего состояния отслеживаемого объекта мониторинга. Результаты выходов модели сохраняются в базу данных, например, в PostgreSQL. В дальнейшем сохраненные данные могут применяться для анализа и переобучения моделей на новых данных.

Для отображения результатов предлагается использовать веб-интерфейс, разработанный на базе веб-фреймворка Streamlit.

**Результаты и обсуждение.** В данной работе представлена архитектура для интеллектуальной системы мониторинга и предиктивного обслуживания металлорежущего оборудования. Предложенная архитектура охватывает весь цикл работы системы – от сбора сырых сигналов до визуализации выходов модели машинного обучения в веб-интерфейсе. Особенностью предлагаемой архитектуры является ее низкая стоимость реализации. Оценочная стоимость предлагаемой системы для одного станка составляет порядка 100 долларов США. Соответственно, данное решение подойдет, как для малых и средних предприятий, так и для лабораторных исследований.

### Литература

1. James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). An introduction to statistical learning: With applications in R (2nd ed.). Springer.
2. Krupitzer, C., Wagenhals, T., Züfle, M., Lesch, V., Schäfer, D., Mozaffarin, A., Edinger, J., Becker, C., & Kounev, S. (2020). A survey on predictive maintenance for Industry 4.0. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2002.08224>
3. Javadov, N. G., Amirov, A. M., & Ismayilov, V. M. (2024). Technical aspects related to the development of a monitoring system for metal-cutting equipment using machine learning. Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii.
4. Javadov, N. G., Amirov, A. M., & Ismayilov, V. M. (2025). Development of an SVM model for predictive maintenance of metal-cutting equipment. Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences (ISA RAS), 75(2).

## SYSTEM DESIGN OF A PREDICTIVE MAINTENANCE SYSTEM FOR METAL-CUTTING EQUIPMENT BASED ON MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Javadov N.G., Amirov A.M., Ismayilov V.M.

**Abstract.** In the modern manufacturing environment, reducing downtime, ensuring the quality of manufactured products, improving reliability and reducing equipment maintenance costs become

priority tasks. In this regard, great attention is paid to the integration of artificial intelligence and machine learning in the optimization of process equipment maintenance. The application of machine learning to analyze real-time data allows to implement the concept of predictive maintenance, which in turn is devoid of the disadvantages of traditional approaches. To implement the concept of predictive maintenance, this paper proposes a hardware and software architecture using machine learning and cloud technologies.

The proposed architecture covers the entire process cycle necessary for the operation of the predictive maintenance system: from collecting data from sensors located at various equipment nodes to classifying the state of the monitored machine element with subsequent output to a web-based user interface.

For implementation of the server part it is proposed to use FastAPI web framework, which provides high performance and is a connecting component between the module for receiving data from the microcontroller, data preprocessor, machine learning model, database for storing the history of the state of the equipment and user interface based on Streamlit.

The distinctive feature of the proposed system is its low cost and high scalability, which opens up the possibility of wide integration of the proposed system into small and medium-sized plants. Also, the proposed architecture implies integration in different production environments and on different types of machines. The modularity of the proposed architecture allows the functionality to be extended without the need for a complete redesign of the system. Thus, the proposed architecture is a technologically flexible and cost-effective solution for implementing a predictive maintenance system in real production processes.

**Keywords:** machine learning, smart manufacturing, maintenance optimization, big data, industry 4.0



## FOREST AREA SEGMENTATION ON SENTINEL-2 SATELLITE IMAGES USING U-NET



**Karimli R.V.**  
Azercosmos, Baku, Azerbaijan  
reyhana.karimli@azercosmos.az



**Askarov H.A.**  
Azercosmos, Baku, Azerbaijan  
hamid.asgarov@azercosmos.az

**Abstract.** The effective monitoring of forest ecosystems, which are vital for global biodiversity and climate change mitigation, presents significant challenges for traditional, labor-intensive survey methods. To address this, our research introduces a robust deep learning pipeline for the automated semantic segmentation of forest cover from 4-band (RGB+NIR) Sentinel-2 satellite imagery, leveraging its high temporal and spatial resolution. We employ an advanced U-Net architecture, using a pre-trained EfficientNet-B6 as a powerful feature-extracting encoder and enhancing the decoder with a Concurrent Squeeze and Excitation (scSE) attention mechanism to refine segmentation boundaries. A key methodological innovation is our two-stage data generation process. An initial dataset was manually annotated by leveraging the high reflectance of healthy vegetation in the near-infrared (NIR) band. This dataset was used to train a baseline model, which then performed model-assisted labeling on a larger corpus of images. Following a thorough manual inspection and correction of these pseudo-labels, the expanded dataset was used to fine-tune the final, more generalized model. This refined model demonstrated excellent performance, achieving a stable validation accuracy of approximately 96% and a strong F1-score of 92%. The high F1-score is particularly important, indicating a robust balance between precision and recall for accurately delineating complex forest edges. Analysis of the training dynamics confirmed the model's ability to generalize without over-fitting. As a practical demonstration, the system was applied to a case study in Azerbaijan, accurately quantifying a net forest area loss of 0.47 km<sup>2</sup>, a 1.47% reduction, between June 2017 and June 2024. This study validates our deep learning framework as a scalable, accurate, and objective tool for providing actionable data to support national forest inventories, environmental management, and enforcement of land-use policies.

**Keywords:** semantic segmentation, satellite imagery, U-Net, deep learning, artificial intelligence, remote sensing

**Introduction.** Forest ecosystems play a vital role in the Earth's biodiversity and climate change mitigation, as millions of plants, animals are harbored by forests and vast amounts of carbon are sunk in them [1]. Despite this, forests have always been negatively influenced by various human activities for numerous purposes such as agriculture, medicine, income, etc. [2,3]. Due to aforementioned reasons, many forest detection and monitoring projects have been implemented to preserve them and prevent further deforestation.

David John and Ce Zhang implemented attention-based U-Net on satellite imagery on different datasets, namely Amazon Rainforest and Atlantic Forest [4]. The project evaluated five classification models with a 4-band image and an RGB image. The analysis concluded that Attention U-Net demonstrated better performance than other classifiers in terms of efficiency and classification metrics, namely IoU, Precision, Recall, and F1-score, on both Validation and Test sets. However, the model lacked generalization and failed to perform equally good on all datasets. The project needs additional fine-tuning with updated masks obtained from the model output, since the actual ground truth labels are missing certain detailed areas and contain many false positives.

Wang et al. (2023) introduced a new model SegForest which is a forest segmentation model specifically designed for remote sensing [5]. The new model is based on SegFormer with a modified decoder, feature fusion, and loss functions. The resulting model was trained on two datasets, DeepGlobe-Forest and Loveda-Forest. The resulting model has stronger generalization and achieves an accuracy of 91% and 85% on the two datasets. The proposed model, however, is incapable of performing on high spatial resolution and multispectral images and needs further research.

Another study focused on monitoring the forest tree dieback caused by insect outbreaks and wildfires [6]. The proposed architecture, named TITANIA, was implemented with an attention mechanism of the U-Net teacher model as a backbone and decoder part of the U-Net student models for the intermediate information. Additionally, inter-channel attention was configured within the skip connections. The given architecture outperformed traditional knowledge distillation strategy; however was limited to the specific geographic area and time.

Currently, with the cutting-edge improvements of the technology, forest monitoring and surveillance have reached another level where human interaction is drastically decreased. In the following paper authors established a very high-resolution labeled dataset using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Artificial Intelligence [7]. The researchers used captured images by UAVs in various scenarios, altitudes, and angles. The collected images were manually labeled and, along with the synthetically generated data, were fed to the semantic segmentation models, namely HRNet and PointFlow Net, which achieved an overall performance of 70%. The study, however, has its limitations and points of improvement, as the model lacks depth information. Additionally, drone images are not timely available at any given time, which also hinders the accurate monitoring and surveillance of the forests.

Several studies used Sentinel-2 imagery for forest segmentation, monitoring, and other remote sensing research. Considering the fact that SentinelHub provides affordable and availability with a five-day frequency, it is the ultimate source of airborne images in multiple bands across the world. Moreover, a short visit period and fair resolution allow timely and effective monitoring of forests.

**Methods. Dataset.** In this study, we used labeled 4-band (RGB+NIR) images of different parts of Azerbaijan from SentinelHub. First, the images were manually labeled by using NIR, which is completely reflected by the healthy vegetation, thus making forest cover visibly separated from other objects and perceivable by the human eye [8]. After the images were manually labeled, we split them into 256x256 tiles and fed them into the model. Finally, we used our trained model to label more Sentinel-2 data, which were thoroughly inspected and manually corrected before fine-tuning our initial model.

**Model.** To perform the semantic segmentation of forest footprints, we employed a deep convolutional neural network based on the U-Net architecture. The implementation was facilitated by the `segmentation_models_pytorch` (smp) library. The core of our model is a U-Net, which consists of two main paths: a contracting path (encoder) to capture context and a symmetric expanding path (decoder). A key feature of the U-Net is the use of skip connections, which concatenate feature maps from the encoder with the corresponding up-sampled feature maps in the

decoder.

**Encoder Backbone, Decoder and Attention Mechanism.** For the encoder path, we utilized a pre-trained EfficientNet-B6 backbone. The encoder was initialized with weights pre-trained on the ImageNet dataset.

To enhance the feature representation during this reconstruction process, we integrated the Concurrent Squeeze and Excitation (scSE) attention mechanism into the decoder blocks. This dual-attention mechanism enables the model to focus on the most salient features for the segmentation task, leading to more refined and accurate outputs.

**Loss Function.** We trained the network by minimizing the Binary Cross-Entropy with Logits Loss (BCEWithLogitsLoss). This loss function is well-suited for binary segmentation tasks as it combines a Sigmoid activation layer with the Binary Cross-Entropy loss in a single, numerically stable function.

**Optimizer.** Model parameters were updated using the AdamW optimizer, with an initial learning rate of  $1 \times 10^{-4}$ .

**Training Environment.** The model was trained for a maximum of 300 epochs with a batch size of 16 on a CUDA-enabled GPU. To prevent over-fitting and reduce unnecessary training time, we implemented an early stopping mechanism with a patience of 20 epochs was configured.

**Results and discussion.** The performance of the U-Net model was rigorously monitored throughout the training process. Figure 1 illustrates the key training dynamics over 250 epochs, showing the model's learning curves for loss on validation and training sets, accuracy, and F1-score on the validation set.

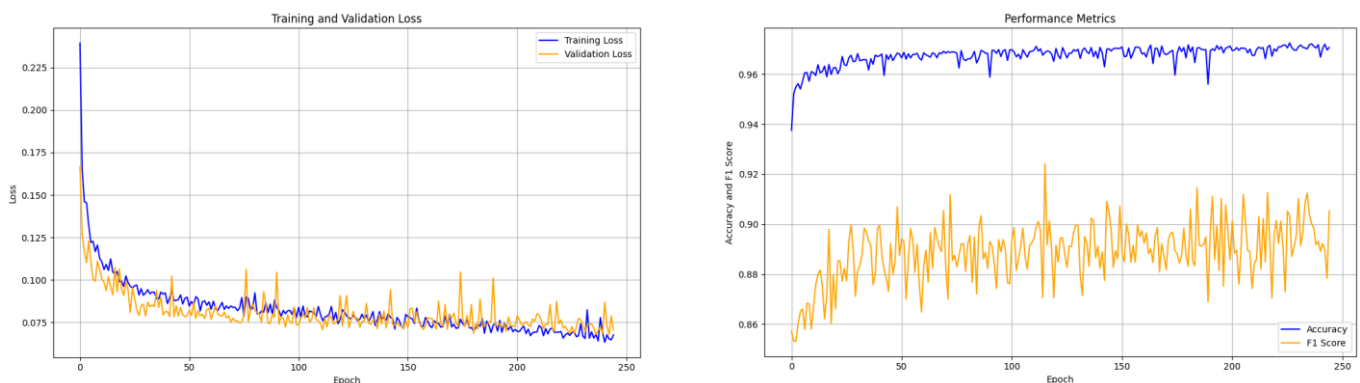


**Figure 1.** Training Loss, Validation Loss, Accuracy, and F1-Score trend of the training

The rightmost image in Figure 1 displays the validation accuracy and F1-score per epoch. Accuracy (blue line) and F1-Score (orange line) both rise rapidly and stabilize at around 96% and 92%, respectively. This demonstrates the model's strong capability to correctly classify the majority of pixels in the images.

Based on these training dynamics, the model checkpoint with the optimal balance of low validation loss and high F1-score was selected for the final analysis. This ensures that the chosen model represents the best possible performance on unseen data, avoiding any potential instability from later epochs.

The validated and optimized model was used to map and quantify forest cover from Sentinel-2 images of the study area for June 2017 and June 2024. The quantitative results of this analysis are summarized in Table 1.

Table 1.  
Calculated forest area for two dates

| Day | Month | Year | Area                  |
|-----|-------|------|-----------------------|
| 25  | June  | 2017 | 32.06 Km <sup>2</sup> |
| 08  | June  | 2024 | 31.59 Km <sup>2</sup> |

We calculated the forest area to be 32.06 km<sup>2</sup> in June 2017 based on the polygon mask predicted by the model. By June 2024, the forested area had decreased to 31.59 km<sup>2</sup>. This represents a net loss of 0.47 km<sup>2</sup>, which corresponds to a 1.47% reduction in total forest cover over the seven years. A visual depiction of this change, showing the spatial distribution of the detected forest cover for both dates, is presented in Figure 2.

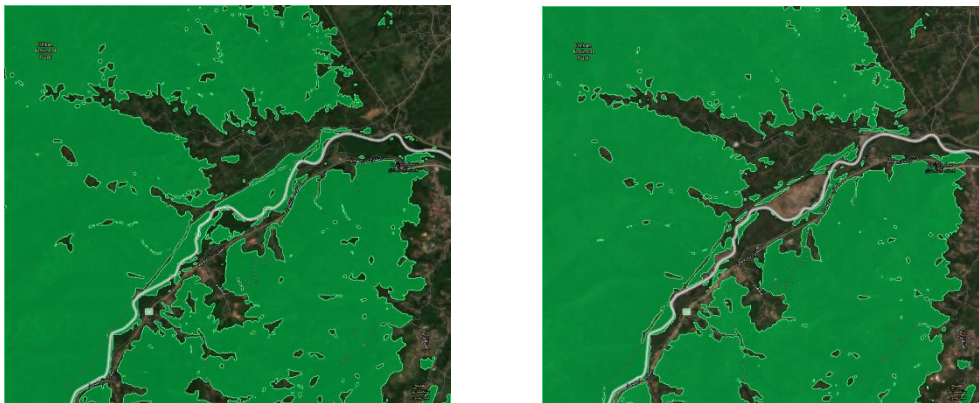


**Figure 2.** Comparison of the detected forest cover of the same area on two different dates. (Left) Detected forest cover on Sentinel-2 image in June 2017. (Right) Detected forest cover on Sentinel-2 image in June 2024

The robust performance metrics illustrated in Figure 1 give us high confidence in the reliability of our model. The stable, high accuracy coupled with a strong F1-score confirms the model's efficacy for this task, and the lack of over-fitting suggests its findings are generalizable. This successful application underscores the power of deep learning as a scalable and objective tool for environmental monitoring.

**Conclusions.** The significance of this work lies in its potential to augment and automate national environmental monitoring efforts. The developed pipeline provides a scalable and cost-effective method for agencies to conduct regular forest audits, track deforestation and afforestation trends, and support evidence-based policymaking. While the results are promising, we recommend several aspects for future research to further enhance this capability, such as Time-Series Analysis, Multi-Class Segmentation. In conclusion, this research confirms that deep learning offers a transformative approach to remote sensing-based environmental science, providing the necessary tools for the effective and timely stewardship of vital natural resources like forests.

## References

1. FAO and UNEP. (2020). The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people. Rome.  
<https://doi.org/10.4060/ca8642en>
2. Bodo, T., Gimah, B. G., & Seomoni, K. J. (2021). Deforestation: Human causes, consequences and possible solutions. *Journal of Geographical Research*, 4(2).  
<https://doi.org/10.30564/jgr.v4i2.3059>

3. Czerepko, J., Gołos, P. T., & Hilszczański, J. (2016). *The importance of forests and forest-timber sector as complements to agriculture and as tools for the regional development of Poland*. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 12(3), 215–225.  
<https://doi.org/10.1504/IJARGE.2016.078275>
4. John, D., & Zhang, C. (2022). An attention-based U-Net for detecting deforestation within satellite sensor imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 107, 102685.  
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102685>
5. Wang, H., Hu, C., Zhang, R., & Qian, W. (2023). SegForest: A Segmentation Model for Remote Sensing Images. *Forests*, 14(7), 1509.  
<https://doi.org/10.3390/f14071509>
6. Filatov, D., & Hassan Yar, G. N. A. (2022). *Forest and water bodies segmentation through satellite images using U-Net*. arXiv.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.11222>
7. Blaga, B.-C.-Z., & Nedevschi, S. (2024). *Forest inspection dataset for aerial semantic segmentation and depth estimation*. arXiv.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.06621>
8. National Aeronautics and Space Administration, Science Mission Directorate. (2010). *Reflected Near-Infrared Waves*.  
[http://science.nasa.gov/ems/08\\_nearinfraredwaves](http://science.nasa.gov/ems/08_nearinfraredwaves)

## U-NET VASITƏSİLƏ SENTİNEL-2 PEYK TƏSVİRLƏRİNDƏ MEŞƏ ƏRAZİLƏRİNİN SEQMENTASIYASI

Kərimli R.V., Əskərov H.Ə.

**Xülasə.** Qlobal biomüxtəliflik və iqlim dəyişikliyinə yumşaldılması üçün həyati əhəmiyyət kəsb edən meşə ekosistemlərinin effektiv monitorinqi ənənəvi, əmək tutumlu tədqiqat metodları üçün ciddi çətinliklər yaradır. Bu problemi həll etmək üçün tədqiqatımızda yüksək zamansal və məkənsal ayırdetmə qabiliyyətindən yararlanaraq, 4-kanallı (RGB+NIR) Sentinel-2 peyk təsvirlərindən meşə örtüyünün avtomatlaşdırılmış semantik seqmentasiyası üçün dayanıqlı bir dərin öyrənmə (deep learning) prosesi təqdim edilir. Biz, güclü bir xüsusiyyət çıxaran kodlayıcı (encoder) kimi əvvəlcədən öyrədilmiş EfficientNet-B6-dan istifadə edən və seqmentasiya sərhədlərini dəqiqləşdirmək üçün dekoderi "Concurrent Squeeze and Excitation" (scSE) diqqət mexanizmi ilə təkmilləşdirən qabaqcıl U-Net arxitekturası tətbiq edirik. Əsas metodoloji yeniliyimiz ikimərhələli məlumat hazırlama prosesimizdir. İlkin məlumat toplusu sağlam bitki örtüyünün yaxın infraqırmızı (NIR) diapazondakı yüksək əksətmə qabiliyyətindən istifadə edilərək əl ilə işarələnmişdir. Bu məlumat toplusu daha sonra geniş təsvir korpusunda model dəstəklə işarələmə həyata keçirən baza modelin təlimi üçün istifadə olunmuşdur. Bu psevdo-işarələrin diqqətli manual yoxlanışı və düzəlişindən sonra, genişləndirilmiş məlumat toplusu yekun, daha ümumiləşdirilmiş modelin dəqiq tənzimlənməsi (fine-tuning) üçün istifadə edilmişdir. Bu təkmilləşdirilmiş model təxminən 96% sabit yoxlama dəqiqliyi və 92% F1 göstəricisi əldə edərək mükəmməl performans nümayiş etdirmişdir. Yüksək F1 göstəricisi, mürəkkəb meşə sərhədlərinin dəqiq təsvir edilməsi üçün dəqiqlik (precision) və həssaslıq (recall) arasında möhkəm bir tarazlığın olduğunu göstərdiyi üçün xüsusilə vacibdir. Öyrənmə dinamikasının təhlili modelin artıq əzbərləmə (over-fitting) olmadan ümumiləşdirmə qabiliyyətini təsdiqləmişdir. Praktiki nümayiş olaraq, sistem Azərbaycanda bir nümunəvi tədqiqata (case study) tətbiq edilmiş və 2017-ci ilin iyun ayından 2024-cü ilin iyun ayınadək olan dövrdə 0.47



*km<sup>2</sup> (1.47% azalma) xalis meşə sahəsi itkisini dəqiq şəkildə hesablamışdır. Bu tədqiqat, milli meşə inventarlarını, ətraf mühitin idarə edilməsini və torpaqdan istifadə siyasətinin icrasını dəstəkləmək üçün praktiki əhəmiyyətli məlumatlar təqdim edən geniş miqyaslı, dəqiq və obyektiv bir vasitə kimi dərin öyrənmə modelimizi təsdiq edir.*

**Açar sözlər:** semantik seqmentasiya, peyk təsvirləri, u-net, dərin öyrənmə, süni intellekt, məsafədən zondlama

## SÜNİ İNTELLEKT ƏSASLI PSIXOEMOSIONAL MONİTORİNG SİSTEMİ



**Rzayeva N.A.**

İnformasiya Texnologiyaları İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
rzayevanezrin6@gmail.com

**Xülasə.** Uzunmüddətli kosmik missiyaların effektiv fəaliyyəti, yalnız texnoloji təminatdan deyil, həmçinin həm də astronavtların fiziki və psixolojisağlamlığının fasiləsiz monitorinqindən və qorunmasından birbaşa bağlıdır. İzləmə çətinlikləri, Yer planetindən uzaqlıq, məhdud sosial ünsiyyət, real tibbi dəstəyin gecikməsi və ya ekstremal mühit şərtləri astronavtlarda yüksək səviyyədə stress, emosional tükənmə və psixoloji qeyri-sabitlik riskini daha da yüksəldir. Bu baxımdan, astronavtların psixoemosional vəziyyətini real vaxt rejimində təhlil etmək, həmçinin erkən mərhələdə riskləri aşkarlamaq və fərdi şəkildə müdaxilə təklif etmək qabiliyyətinə malik olan süni intellektə (Sİ) əsaslanan kiberfiziki sistemlərin (KFS) tətbiqi aktuallaşır. Süni intellektə (Sİ) əsaslanan kiberfiziki sistemlər, yalnız astronavtların psixoloji sağlamlığını qorumaqla kifayətlənməyib, eyni zamanda onların fiziki imkanlarını artırmağa və missiyanın səmərəliliyini təmin etmək funksiyasını da yerinə yetirir. Həmçinin təqdim olunan məqalədə belə bir sistemin konseptual modeli verilir. Sistem geyilə bilən sensor qurğular (bədənin temperaturu, nəbz, dərialtı elektrik keçiriciliyi, EEG və s.), süni intellekt texnologiyaları əsasında çalışan neyroşəbəkə analiz modulları və emosional vəziyyəti stabiləşdirmək üçün avtomatik korreksiya bloklarından ibarətdir. Bu bloklar fizioloji vəziyyətin idarə olunması texnologiyaları, tənəffüs məşqləri və ya səsli yönəldilən rahatlaşdırıcı müdaxilələr kimi çıxış edə bilər. Sistem həmçinin zamanla istifadəçinin fərdi emosional reaksiyalarını öyrənir və adaptiv davranış modelləri quraraq daha da dəqiq və proqnozlaşdırıcı müdaxilə imkanları təmin edir. Bu sistemlər, astronavtların psixoemosional və fiziki vəziyyətlərini real vaxt rejimində izləyərək, erkən mərhələlərdə potensial riskləri aşkarlamaq və müdaxilə etmək qabiliyyətinə malikdir. Nəticə etibarilə, bu cür intellektual kiberfiziki sistemlər (KFS) kosmik tədqiqatların davamlılığı və astronavtların rifahının qorunması üçün mühüm texnoloji baza yaradır. Gələcəkdə belə sistemlər, həm kosmik tədqiqatlarda, həm də ekstremal şəraitlərdə çalışan insanlar üçün universal dəstək mexanizminə çevrilə bilər.

**Açar sözlər:** kiberfiziki sistem, süni intellekt, astronavt, geyilə bilən sensorlar, psixoemosional vəziyyət, monitorinq.

**Giriş.** Son illərdə texnologiya sahəsində, xüsusilə də süni intellektin (Sİ) tətbiq dairəsi sürətlə daha da inkişaf edir. Seçilmiş alqoritmlərə əsaslanan rəqəmsal köməkçilər və chatbotlar insan sağlamlıq dəstəyinə daha əlçatan, anonim və fərdi formada təqdim etməklə, ənənəvi psixoloji yardım formalarının məhdud əlçatanlıq problemini aradan qaldırmağa imkan yaradır. Lakin bu cür tətbiqlərin effektivliyi və təhlükəsizliyi hələ də dərin elmi araşdırmalara ehtiyac duyur.

Xüsusilə uzunmüddətli kosmik missiyalar zamanı ekipaj üzvlərinin psixoemosional sabitliyinin təmin olunması müasir kosmonavtikanın əsas vəzifələrindən biri olaraq qalır. Skylab-4 (1973) stansiyasındakı insidentlər və "Salyut-7" ekipajında müşahidə olunan emosional yüklənmə hallarına əsaslanan tarixi təcrübələr, izolasiya, sensor deprivasiya və sosial əlaqə çatışmazlığının insan sağlamlığına güclü təsir etdiyini sübut etmişdir. Bu kimi faktorlar koqnitiv qeyri-sabitlik, iş qabiliyyətinin azalması, sosial münasibətlərdə gərginlik və emosional tükənmə ilə nəticələnir [1,2]. Gələcək Ay və Mars missiyaları çərçivəsində, bu risklər daha da artır, çünki avtonom qalma

müddəti və tibbi müdaxilənin gecikməsi astronavtların psixoloji sağlamlığını ciddi şəkildə təhlükə altına alır.

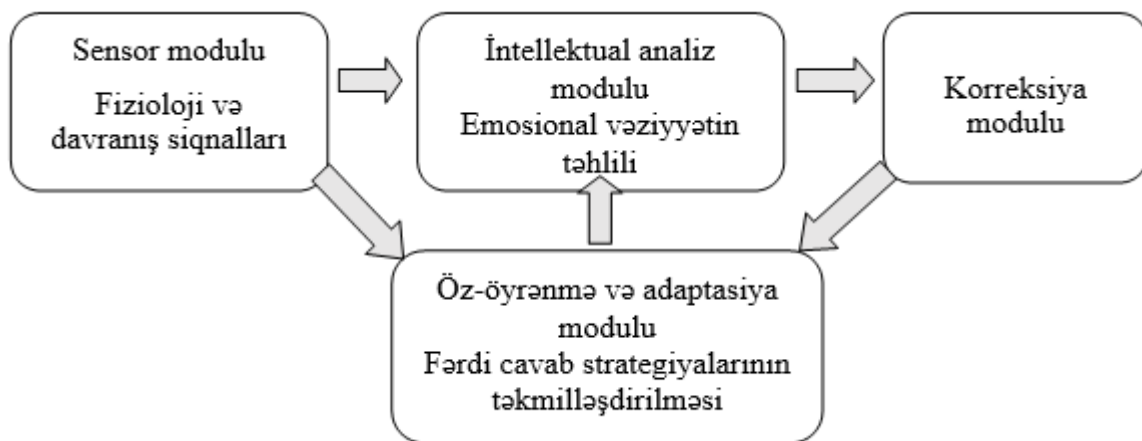
Bu kontekstdə, astronavtların psixosomasiyal vəziyyətinin fasiləsiz monitorinqi və dəqiq şəkildə qiymətləndirilməsi üçün Sİ əsaslanan intellektual kibernetik sistemlərin (KFS) arxitekturası, funksional komponentləri və işləmə prinsipləri dərin təhlil tələb edir [3,4].

Tədqiqatın məqsədi uzunmüddətli kosmik missiyalar şəraitində astronavtların emosional sabitliyini qorumaq üçün Sİ əsaslanan, geyilə bilən sensorlarla inteqrasiya olunmuş intellektual KFS yaradılmasıdır. Bu sistem real vaxt rejimində fizioloji və davranış indikatorlarını qeydə almaq, emal edib analiz etmək, emosional vəziyyəti qiymətləndirmək və avtomatik korreksiya mexanizmləri vasitəsilə cavab reaksiya formalaşdırmaq üçün nəzərdə tutulmuşdur [5].

**Konseptual model.** Psixoloji uyğunluq və qrup dinamikası kosmik tədqiqatlarda aktual məsələlələndir. NASA və ESA tərəfindən həyata keçirilən müxtəlif proqramlarda – məsələn, Mars Analogue Research Station (MARS), Human Research Program (HRP), SIRIUS və Mars500 – iştirakçılar arasında sosial münasibətlər, emosional uyğunlaşma və qavrayış sabitliyi kimi meyarlar sistemə şəkildə araşdırılmışdır. Araşdırmalar göstərir ki, uzunmüddətli izolasiya şəraitində astronavtların emosional reaktivliyi dəyişir və bu, missiyanın uğurlu yerinə yetirilməsinə mənfi təsir göstərə bilər. Lakin indiyədək mövcud texnologiyalar yalnız fiziki sağlamlığın izlənməsinə yönəlmiş, emosional və psixoloji vəziyyətin avtomatik analizi və korreksiyası ilə bağlı komponentlər isə ya ümumiyyətlə olmayıb, ya da məhdud funksional imkanlara malik olub [6].

Bu vəziyyətdə biz, Sİ və geyilə bilən sensorlarla birləşdirilmiş, psixosomasiyal vəziyyəti real vaxtda təhlil və idarə edə bilən konseptual model təklif edirik. Bu model yalnız monitorinq funksiyası ilə kifayətlənməyib, həm də emosional narahatlıqlara qarşı adaptiv cavab mexanizmləri təqdim edir və astronavtın şəxsi xüsusiyyətlərinə uyğun olaraq nizamlana bilər. Beləliklə, təqdim olunan sistem psixoloji uyğunluğun texnoloji təminatı üçün yeni bir dövrü təmsil edir və uzunmüddətli kosmik ekspedisiyalarda sosial-psixoloji sabitliyin qorunmasına töhfə verir.

Təklif olunan intellektual KFS dörd əsas texnoloji bloklardan ibarətdir: sensor modulu, intellektual analiz modulu, korreksiya modulu, öz-öyrənmə və adaptasiya modulu (Şəkil 1).



**Şəkil 1.** Təklif olunan sistemin konseptual modeli.

Modulların vahid intellektual KFS-də funksional inteqrasiyası psixosomasiyal sabitliyin fasiləsiz monitorinqini və adaptiv tənzimlənməsini təmin edir.

Sensor modulu geyilə bilən cihazlar əsasında qurulur və astronavtın fizioloji siqnallarını qeydə alır: bunlara HRV (ürək ritminin variasiyası), EDA (dəri elektrik aktivliyi), EEG (beyin siqnalları), yuxu rejimi, nitq və bədən temperaturu daxildir. Bu indikatorlar astronavtın stress,

narahatlıq, yorğunluq kimi hallara verdiyi fizioloji reaksiyaların obyektiv ölçülməsinə imkan yaradır.

İntellektual analiz modulu daxil olan biosiqnalların emalını həyata keçirir. Burada dərin öyrənmə texnologiyaları, xüsusilə LSTM, GRU və Autoencoder modelləri istifadə olunur [7]. Bu neyroşəbəkələr siqnal ardıcılığında zamanla bağlı asılılığı öyrənərək emosional halı klassifikasiya edir: misal üçün "stabil", "orta stress", "yüksək stress", "emosional tükənmə" və s.

Korreksiya modulu qiymətləndirmə modulundan daxil olan emosional dərəcələrə uyğun cavab mexanizmlərini aktivləşdirir. Bu modulda adaptiv nəfəs təlimləri, musiqi terapiyası, Sİ-söhbət interfeysləri və vizual rahatlandırıcı elementlər mövcuddur. Onlar astronautla əlaqə saxlayaraq psixoemosional balansını təmin etməyə yardım edir.

Bütün bu modullar lokal emal üzərində qurulduğu üçün sistem daimi internet əlaqəsində olmadan da funksionallığını qoruyub saxlayır. Bu, kosmik şəraitdə çox vacibdir. Sistemin öz-öyrənmə imkanları istifadəçi davranış modelinə zamanla adaptasiyanı təmin edir və daha dəqiq fərdi korreksiya strategiyaları qurur.

Öz-öyrənmə və adaptasiya modulu sistemin zamanla daha ağıllı və fərdi hala gəlməsini təmin edən vacib elementdir. Bu modul astronautın emosional reaksiyalarının tarixçəsini toplayıb təhlil edir və bunun əsasında fərdi adaptasiya strategiyaları formalaşdırır. Məsələn, sistem hansı müdaxilələrin (musiqi, nəfəs məşqi və s.) konkret astronaut üçün daha effektiv olduğunu müəyyənləşdirir və bu öyrənməni sistemin davranışına əsaslanaraq tətbiq edir. Öz-öyrənmə modulu intellektual analiz modulu ilə qarşılıqlı əlaqədə işləyir – analizdən aldığı məlumatlar əsasında modeli təkmilləşdirir və yenilənmiş model parametrlərini yenidən analiz moduluna ötürür (sxemdə iki tərəfli ox). Nəticədə, analiz modulu zaman keçdikcə həmin astronaut üçün daha dəqiq emosional qiymətləndirmə aparmağa başlayır.

**Nəticə.** Kosmik tədqiqatların yeni mərhələyə keçdiyi dövrdə, astronautların psixoloji sabitliyi və emosional rifahı texnoloji missiyaların uğur amilinə çevrilmişdir. Mövcud texnologiyaların bu sahədəki məhdud imkanları, daha çevik, fərdi və Sİ zənginləşdirilmiş yanaşmaların tətbiqini zəruri edir. Təklif olunan intellektual KFS bu tələblərə cavab verərək, astronautların fizioloji və psixoemosional vəziyyətini real vaxt rejimində təhlil etməyə, riskli halları vaxtında aşkara çıxarmağa və fərdiləşdirilmiş korreksiya vasitəsilə cavab tədbirləri həyata keçirməyə imkan yaradır. Sistemin strukturu, adaptiv öyrənmə imkanları və avtonom işləmə qabiliyyəti onu uzunmüddətli kosmik missiyalar üçün effektiv psixoloji dəstək platformasına çevirir. Bu yanaşma həm də hazırda aktual olan insan mərkəzli Cəmiyyət 5.0 strategiyasının bir hissəsi kimi qiymətləndirilə bilər.

### Ədəbiyyat

1. Brooks, S. K., Webster, R. K., Smith, L. E., Woodland, L., Wessely, S., Greenberg, N., & Rubin, G. J. (2020). The psychological impact of quarantine and how to reduce it: Rapid review of the evidence. *The Lancet*, 395(10227), 912–920.  
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30460-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30460-8)
2. Ермакова, О. М. (2021). Влияние ситуации изоляции на психическое здоровье людей. *Ученые записки Санкт-Петербургского университета технологий управления и экономики*, 2(74), 52–59.
3. Reynaud, S., & Roxin, A. (2025). Review of explainable artificial intelligence for cybersecurity systems. *Discover Artificial Intelligence*, 5(78).  
<https://doi.org/10.1007/s44163-025-00318-5>
4. Aldoseri, A., Al-Khalifa, K. N., & Hamouda, A. M. (2024). AI-powered innovation in digital transformation: Key pillars and industry impact. *Sustainability*, 16(5), 1790.  
<https://doi.org/10.3390/su16051790>

5. Arnould, A. (2019). Colonising Mars: A time frame for ethical questioning. In K. Szocik (Ed.), *Human factor in a mission to Mars: An interdisciplinary approach* (pp. 133–144). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-02059-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02059-0_9)
6. Sboev, A. G., Naumov, A., & Rybka, R. B. (2021). Data-driven model for emotion detection in Russian texts. *Procedia Computer Science*, 190, 637–642.  
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.06.075>
7. Mienye, I. D., Swart, T. G., & Obaido, G. (2024). Recurrent neural networks: A comprehensive review of architectures, variants, and applications. *Information*, 15(9), 517.  
<https://doi.org/10.3390/info15090517>

## ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED PSYCHO-EMOTIONAL MONITORING SYSTEM

Rzayeva N.A.

**Abstract.** *The effective operation of long-duration space missions directly depends not only on technological support, but also on the continuous monitoring and protection of the physical and psychological health of astronauts. Tracking difficulties, remoteness from planet Earth, limited social communication, delay in real medical support or extreme environmental conditions further increase the risk of high levels of stress, emotional exhaustion and psychological instability in astronauts. In this regard, the application of artificial intelligence (AI)-based cyber-physical systems (CPS), which are capable of analyzing the psycho-emotional state of astronauts in real time, as well as detecting risks at an early stage and offering individualized intervention, is becoming relevant. Artificial intelligence (AI)-based cyber-physical systems not only protect the psychological health of astronauts, but also perform the function of increasing their physical capabilities and ensuring the effectiveness of the mission. The presented article also provides a conceptual model of such a system. The system consists of wearable sensor devices (body temperature, pulse, subcutaneous electrical conductivity, EEG, etc.), neural network analysis modules based on artificial intelligence technologies, and automatic correction blocks for stabilizing the emotional state. These blocks can act as physiological state management technologies, breathing exercises, or voice-guided relaxation interventions. The system also learns the user's individual emotional reactions over time and builds adaptive behavioral models, providing more accurate and predictive intervention capabilities. These systems are capable of detecting and intervening in potential risks at early stages by monitoring the psychoemotional and physical states of astronauts in real time. As a result, such intelligent cyber-physical systems (CPS) create an important technological basis for the sustainability of space exploration and the protection of astronauts' well-being. In the future, such systems can become a universal support mechanism for people working both in space exploration and in extreme conditions.*

**Keywords:** *cyberphysical system, artificial intelligence, astronaut, wearable sensors, psychoemotional state, monitoring.*



## ROTATION-ROBUST IMAGE STITCHING FOR AEROSPACE MONITORING



**Malikov S.P.**

Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan  
sadiq.parvizoglu@gmail.com



**Sabziev E.N.**

Institute of Control Systems, National Defense University, Baku, Azerbaijan  
elkhansabziev@gmail.com



**Pashayev A.B.**

Institute of Control Systems, National Defense University, Baku, Azerbaijan  
adalat.pashayev@gmail.com

**Abstract.** Constructing panoramic images from overlapping visual inputs is a fundamental challenge in computer vision, particularly in aerospace monitoring systems where wide-area visual coverage is essential. Platforms such as unmanned aerial vehicles (UAVs) and Earth observation satellites routinely capture sequential image frames with partial overlaps, which must be efficiently merged to generate continuous, high-resolution panoramas. These panoramas are critical for applications such as environmental surveillance, disaster assessment, border monitoring, and infrastructure mapping. This paper introduces a computationally efficient and rotation-resilient image stitching method that relies solely on geometric transformations—specifically, rotation and translation—applied to downscaled versions of input images. By reducing image resolution during the alignment phase, the method significantly lowers computational costs while preserving sufficient structural information for accurate stitching. The technique eliminates the need for conventional feature matching algorithms or learning-based models, making it suitable for embedded systems with limited processing capabilities, including onboard UAV systems. The stitching pipeline involves three main stages: image scaling, exhaustive search for the optimal transformation parameters, and final image composition. The method evaluates alignment quality based on pixel-wise differences in overlapping regions, allowing it to perform reliably even in the presence of significant rotational and translational variation. Once the best transformation is identified, it is scaled up and applied to the original images to generate the final panorama. Experimental evaluations demonstrate the robustness and efficiency of the method across a range of scenarios, including aerial scenes with dynamic motion and variable perspectives. Its adaptability and low resource requirements make it a strong candidate for real-time panoramic construction in aerospace monitoring tasks, where both speed and reliability are critical for mission success.

**Keywords:** image stitching, panorama construction, geometric transformation, aerial imaging, satellite monitoring, real-time processing.

**Introduction.** Image stitching combines overlapping images into a single panoramic or high-resolution view, enabling wide-field and detailed representations critical for aerospace monitoring. These systems often integrate imagery from multiple aerial or satellite sensors to observe large geographic regions for environmental monitoring, disaster response, defense, and security. Traditional stitching methods rely on consistent overlap and exposure, while algorithms like SURF improved robustness against rotation, scale, and lighting variations. Recent deep learning methods (e.g., Deep Seam, UDIS) further enhance seam detection and alignment in complex scenes with occlusions or geometric distortions [1-3]. Additionally, specialized techniques for multi-spectral and hyperspectral data extend stitching capabilities to spectral imaging used in aerospace applications [4].

The core challenge is to align two overlapping images  $I$  and  $J$  by estimating a geometric transformation that minimizes discrepancies in the shared region. In aerospace contexts, this involves handling significant rotations, translations, and viewpoint changes caused by sensor motion or terrain relief. Algorithms must also remain robust to lighting variation, occlusion, and non-uniform overlaps—while being efficient enough for near real-time use in tasks like surveillance or satellite mosaicking.

This work proposes a rotation-robust stitching method tailored for aerospace systems. It begins by downscaling input images to reduce computational cost, then searches over potential shifts and rotations to identify the best alignment based on similarity metrics. By avoiding complex feature detectors or deep networks, this approach maintains both accuracy and speed, making it well-suited for large-scale, dynamic aerospace datasets where real-time performance and geometric reliability are essential.

**Methods and solution.** This section presents the conceptual and technical foundations of our proposed image stitching method. The goal is to efficiently align and stitch two input images, denoted as  $I$  and  $J$ , that exhibit partial overlap and may differ by rotation and translation. The method is designed to be robust against geometric discrepancies while maintaining low computational cost for potential real-time applications.

To ensure clarity in describing the stitching pipeline, we first define several essential concepts related to digital images and geometric transformations:

*Difference of pixels.* The difference between two pixels  $p$  and  $q$  is measured using the function  $\delta(p, q)$ , which calculates the total of the absolute differences between their corresponding color channel values:

$$\delta(p, q) = |p_r - q_r| + |p_g - q_g| + |p_b - q_b|$$

Translation operation can be described mathematically using the following transformation matrix:

$$T_{t_x, t_y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Scaling operation is described using the following matrix:

$$S = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotation around the origin by a given angle  $\alpha$  :

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotation around the image center. Consider an input image  $I$  with width  $w$  and height  $h$ . The coordinates of the image center are defined as:

$$(c_x, c_y) = \left(\frac{w}{2}, \frac{h}{2}\right)$$

To rotate the image  $I$  by an angle  $\alpha$  around this center, the following steps are carried out:

A. *Construct the combined transformation matrix.*

To rotate an image about its center, we use a combined geometric transformation that involves these steps:

- Translate the image so that its center point  $(c_x, c_y)$  is shifted to the origin.
- Rotate the image around the origin by angle  $\alpha$ .
- Translate the image back to reposition the rotated content to its original center.

This process can be represented as a multiplication of matrices:

$$M_{c_x, c_y, \alpha} = T_{c_x, c_y} \cdot R_\alpha \cdot T_{-c_x, -c_y}$$

B. *Apply inverse mapping and assign pixel values accordingly.*

To create the rotated image, inverse mapping is employed. For each output pixel  $I_{x', y'}^{(\alpha)}$ , we determine the corresponding continuous coordinates  $(x, y)$  in the input image  $I$ , and discretize it using the floor operation:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = M_{c_x, c_y, \alpha}^{-1} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}, \quad I_{x', y'}^{(\alpha)} = \begin{cases} I_{\lfloor x \rfloor, \lfloor y \rfloor}, & \text{if } (\lfloor x \rfloor, \lfloor y \rfloor) \in I \\ (0, 0, 0), & \text{otherwise} \end{cases}$$

This approach guarantees that every output pixel corresponds to a valid discrete position in the input image, preventing gaps that can occur with forward mapping [5,6].

C. *Perform a validity check to ensure proper mapping.*

We define an indicator function  $\gamma_{I^{(\alpha)}}(x', y')$  to express the validity of each pixel in the rotated image  $I^{(\alpha)}$ . For each output location  $(x', y')$ , let  $(x, y)$  be the corresponding input point obtained via inverse mapping. Then:

$$\gamma_{I^{(\alpha)}}(x', y') = \begin{cases} 1, & \text{if } (\lfloor x \rfloor, \lfloor y \rfloor) \in I \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Because the empty areas in the output image are filled with black (intensity 0), this function helps differentiate between pixels that were originally black in the input and those that appear black because they lie outside the valid region.

To efficiently stitch two images with unknown rotation and translation, we propose a matrix-based approach that uses scaling and geometric transformations. Our method estimates the necessary rotation and translation to align images accurately, even under significant differences, while matrix operations improve robustness to noise and simplify computation—making it ideal for real-time applications. The solution follows:

A. *Data reduction*

The input images  $I$  and  $J$  are first subjected to a uniform downscaling process by applying a scaling matrix  $S$ , which produces the reduced-size images  $\tilde{I}$  and  $\tilde{J}$ .

B. *Searching optimal parameters*

We search for the optimal alignment by sliding and rotating the downscaled image  $\tilde{J}$ , forming the transformed image  $\tilde{J}^{(v)}$  where the vector  $v = (\alpha, t_x, t_y)$  encodes the transformation parameters.

Here  $\alpha$  denotes the rotation angle applied around the center of the image, and  $t_x$ ,  $t_y$  represent the horizontal and vertical translations, respectively. This transformed image is obtained by applying a combined transformation consisting of rotation and translation matrices to  $\tilde{J}$ .

The optimal transformation  $v^*$  minimizes the total difference over the overlapping region:

$$v^* = \arg \min_v \sum_{(i,j) \in \tilde{I} \cap \tilde{J}^{(v)}} \gamma_{\tilde{J}^{(v)}}(i,j) \cdot \delta(\tilde{I}_{i,j}, \tilde{J}_{i,j}^{(v)})$$

where:

- $w_1, h_1$  denote the width and height of  $\tilde{I}$ ,
- $w_2, h_2$  denote the width and height of  $\tilde{J}^{(v)}$ .

Since the alignment process is performed on downscaled versions of the input images, the optimal transformation vector  $v^*$  must be scaled back to the original image resolution before being applied. Specifically, the translation components  $t_x^*$  and  $t_y^*$  are multiplied by the inverse of the scaling factor, while the rotation angle  $\alpha^*$  remains unchanged, as rotation is scale-invariant. This ensures that the transformation is correctly mapped to the original image dimensions for accurate stitching.

### C. Final stitching

The final stitched image  $P$  is created by placing the reference image  $I$  at the origin of the output canvas. The second image  $J$  is then transformed using the optimal vector  $v^*$ , obtained through feature matching, to align it with  $I$ . The transformed image  $J'$  is inserted into  $P$  at the position defined by  $v^*$ , ensuring aligned features. Seamless blending across overlaps is achieved using post-processing techniques like multiband blending [7].

**Results and discussion.** The proposed rotation-robust stitching method was evaluated using a dataset of aerial and satellite images simulating typical scenarios in aerospace monitoring. Performance metrics focused on alignment accuracy, computational efficiency, and robustness against geometric distortion.

To enhance computational efficiency, the input images are uniformly downscaled by a scale factor of 10 during the alignment phase. This corresponds to a 100-fold reduction in the number of pixels, significantly lowering processing time while preserving sufficient structural details to accurately estimate the optimal transformation parameters.

Results demonstrate that the method reliably aligns overlapping image pairs with rotation differences up to  $\pm 20^\circ$ , and translation shifts of hundreds of pixels, even in the absence of traditional feature points. In practice, the search space for the transformation parameters is limited to improve efficiency:

- The rotation angle  $\alpha$  varies from  $-20^\circ$  to  $20^\circ$ .
- The horizontal translation  $t_x$  varies from  $-w_2$  to  $w_1$ .
- The vertical translation  $t_y$  varies from  $-h_2$  to  $h_1$ .

Experimental results confirmed successful panorama construction in diverse environments including mountainous terrain, coastal borders, and urban areas, with minimal artifacts or stitching seams.

**Conclusions.** This paper presented an efficient and rotation-resilient image stitching method tailored for aerospace monitoring applications. By leveraging geometric transformations and downscaled image alignment, the method avoids complex feature matching or learning-based models, making it suitable for real-time and embedded systems. The approach demonstrated strong robustness against rotation and translation variations while maintaining computational efficiency. Its adaptability to diverse aerial and satellite imagery highlights its potential for critical aerospace

applications, including surveillance, mapping, and disaster monitoring, where accuracy, speed, and low resource usage are vital.

### References

1. Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2008). Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3), 346–359.  
<https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014>
2. Cheng, S., Yang, F., Chen, Z., Yuan, N., & Tao, W. (2023). Deep seam prediction for image stitching based on selection consistency loss. *arXiv (Cornell University)*.  
<https://doi.org/10.48550/arxiv.2302.05027>
3. Nie, L., Lin, C., Liao, K., Liu, S., & Zhao, Y. (2023). Parallax-Tolerant unsupervised deep image stitching. *arXiv (Cornell University)*.  
<https://doi.org/10.48550/arxiv.2302.08207>
4. Wisotzky, E. L., Triller, J., Hilsmann, A., & Eisert, P. (2024). Multispectral Stereo-Image fusion for 3D hyperspectral scene reconstruction. *arXiv (Cornell University)*.  
<https://doi.org/10.48550/arxiv.2401.09428>
5. Farid, M. S., Lucenteforte, M., & Grangetto, M. (2013). Depth image based rendering with inverse mapping. *2022 IEEE 24th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP)*, 135–140.  
<https://doi.org/10.1109/mmisp.2013.6659277>
6. Leow, A., Huang, S., Geng, A., Becker, J., Davis, S., Toga, A., & Thompson, P. (2005). Inverse consistent mapping in 3D deformable image registration: its construction and statistical properties. *Lecture Notes in Computer Science*, 493–503.  
[https://doi.org/10.1007/11505730\\_41](https://doi.org/10.1007/11505730_41)
7. Li, X., Zhu, W., & Zhu, Q. (2019). Panoramic video stitching based on multi-band image blending. *Tenth International Conference on Graphics and Image Processing*, 82.  
<https://doi.org/10.1117/12.2524247>

## KOSMİK MONİTORİNG ÜÇÜN DÖNDÜRMƏYƏ DAVAMLI ŞƏKİL BİRLƏŞDİRMƏ

Məlikov S.P., Səbzəyev E.N., Paşayev Ə.B.

**Xülasə.** Üst-üstə düşən görüntülərdən panoramik şəkillərin yaradılması kompüter görməsi sahəsində, xüsusilə geniş ərazinin vizual əhatəsinin tələb olunduğu kosmik monitorinq sistemlərində fundamental məsələlərdən biridir. Pilotsuz uçuş aparatları (PUA) və Yer müşahidə peykləri kimi platformalar ardıcıl, qismən üst-üstə düşən görüntü kadrları əldə edir və bu kadrların effektiv şəkildə birləşdirilərək davamlı və yüksək dəqiqlikli panoramik təsvirlər yaradılması tələb olunur. Belə panoramik təsvirlər ekoloji nəzarət, fəlakət qiymətləndirilməsi, sərhəd monitorinqi və infrastruktur xəritələşdirilməsi kimi vacib tətbiq sahələrində geniş istifadə olunur. Bu məqalədə, daxil olan şəkillərin aşağı ölçülü versiyalarına tətbiq olunan yalnız həndəsi transformasiyalar — döndürmə və sürüşdürmə — əsasında hesablama baxımından effektiv və döndürməyə davamlı şəkil birləşdirmə üsulu təqdim olunur. Hizalama mərhələsində şəkil həcmnin azaldılması hesablamaların xərclərini əhəmiyyətli dərəcədə aşağı salır və eyni zamanda dəqiq birləşdirmə üçün kifayət qədər struktur məlumatını qoruyur. Təklif olunan üsul ənənəvi xüsusiyyət uyğunlaşdırma alqoritmlərinə və ya öyrənməyə əsaslanan modellərə ehtiyacı aradan qaldıraraq məhdud



*hesablama imkanlarına malik yerləşdirilmiş sistemlərdə, o cümlədən PUA platformalarının gövdə sistemlərində tətbiq üçün əlverişlidir. Birləşdirmə prosesi üç əsas mərhələdən ibarətdir: şəkillərin ölçüsünün kiçildilməsi, optimal transformasiya parametrlərinin geniş axtarışı və yekun görüntünün tərtibi. Üst-üstə düşən sahələrdə piksel səviyyəsində fərqlərin qiymətləndirilməsi uyğunluğun keyfiyyətini müəyyən etməyə imkan verir və bu da ciddi döndürmə və sürüşdürmə variasiyaları mövcud olduqda belə etibarlı nəticələr əldə etməyə şərait yaradır. Optimal transformasiya parametrləri müəyyən edildikdən sonra həmin transformasiya orijinal görüntülərə tətbiq edilərək yekun panorama hazırlanır. Eksperimental qiymətləndirmələr metodun müxtəlif şəraitlərdə, o cümlədən dinamik hərəkət və fərqli perspektivlərin mövcud olduğu hava görüntülərində həm dayanıqlığını, həm də səmərəliliyini təsdiqləmişdir. Metodun adaptivliyi və aşağı resurs tələbləri onu kosmik monitoring tapşırıqlarında — sürət və etibarlılığın missiya uğuru üçün vacib olduğu hallar üçün — real vaxt panoramik görüntü yaratma üçün effektiv vasitə kimi önə çıxarır.*

**Açar sözlər:** *şəkil birləşdirmə, panorama qurulması, həndəsi transformasiya, hava görüntüləri, peyk monitoringi, real vaxt emalı.*

## AUTOMATING ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT WITH AI: A NEW ERA FOR MILITARY RADIATION AND CHEMICAL SECURITY



**Akhundov R.G.**

National Defense University, Baku, Azerbaijan  
axundov.ramil@mmu.edu.az



**Islamov I.J.**

Baku Engineering University, Baku, Azerbaijan  
isislamov@beu.edu.az

**Abstract.** Artificial Intelligence (AI) has the potential to revolutionize the way military forces assess and respond to radiation and chemical hazards. Traditional risk assessment methods are often slow, error-prone, and inefficient in the face of rapidly evolving threats. This article explores the application of AI in automating environmental risk assessments in military settings, particularly focusing on radiation and chemical security. AI-powered systems can process large datasets, predict the spread of hazards, enhance decision-making, optimize resource allocation, and automate reporting processes. By integrating AI into military environmental risk assessments, forces can improve their ability to detect, mitigate, and respond to environmental threats in real-time, ultimately enhancing operational efficiency and protecting personnel and resources.

**Keywords:** Artificial Intelligence, environmental risk, radiation, chemical, nuclear accident.

**Introduction.** In the context of military operations, managing radiation and chemical hazards is a critical aspect of ensuring the safety of personnel and the success of missions. The traditional methods of assessing environmental risks are often time-consuming and prone to human error, leading to delayed responses and insufficient preparedness. However, with the rapid advancements in Artificial Intelligence (AI), there is a significant opportunity to revolutionize the way military forces assess and respond to radiation and chemical threats. AI's ability to process large amounts of data, identify patterns, and make predictive analyses offers a new frontier in automated environmental risk assessment for the military.

This article explores the potential of AI to automate environmental risk assessments, particularly in the context of radiation and chemical security in military settings. It discusses how AI-powered systems can enhance decision-making, improve real-time hazard detection, and optimize resource allocation, ultimately leading to more efficient and effective responses to environmental threats in military operations.

**Main part.** Before AI can be fully integrated into military environmental risk assessment, it is essential to understand the limitations of current methods. Traditionally, military personnel rely on manual inspections, radiation detectors, and chemical hazard sensors to assess the environment. While these methods are valuable, they often lack the ability to rapidly analyze large datasets, integrate real-time information, and predict future risks.

Furthermore, current systems are limited in their ability to forecast the spread and impact of radiation or chemical agents over time. In many cases, the data collected is fragmented and does not offer a comprehensive view of the broader environmental situation, making it difficult for military leaders to make informed decisions. These gaps create a need for more advanced and automated solutions that can overcome these barriers.

Artificial Intelligence (AI) has the potential to revolutionize the way environmental risk assessments are conducted, especially in the context of radiation and chemical security in the military. Traditional methods of risk assessment often rely on manual inspections, sensors, and human judgment, which can be slow, prone to error, and insufficient for the complexities of modern warfare and environmental threats. AI-powered systems, however, can automate and optimize these processes, making them faster, more accurate, and more efficient. In this section, we delve deeper into the specific roles AI can play in automating environmental risk assessments in military settings, particularly in relation to radiation and chemical hazards.

One of the key strengths of AI is its ability to process and analyze large volumes of data from multiple sources in real time. Military operations generate vast amounts of data, often from radiation detectors, chemical agent monitors, satellite imagery, and other environmental sensors deployed in the field. AI systems, specifically machine learning (ML) algorithms, can analyze this data far more quickly than human operators and with greater precision.

For example, radiation sensors deployed in a military zone might generate continuous data streams that human operators cannot monitor in real time, especially in dynamic environments. AI can analyze this incoming data instantly, detecting patterns and anomalies that might indicate the presence of hazardous radiation. The system can then trigger immediate alerts, warning military personnel about the threat and enabling them to take necessary actions, such as evacuation or contamination control.

Similarly, AI can process environmental data from multiple chemical sensors. In traditional settings, chemical agents such as nerve gas or toxins might go undetected for a critical period if manual analysis is required. AI systems can continuously analyze environmental data from chemical detectors, flagging unusual concentrations or patterns that might indicate a chemical attack or spill. By automating this process, AI reduces the time needed to detect and respond to chemical threats.

Another major advantage of AI in environmental risk assessment is its ability to predict the spread and impact of radiation and chemical threats. Using predictive analytics, AI can model the dispersion of hazardous materials across large areas, taking into account factors such as wind patterns, topography, and weather conditions. These predictions are essential in military environments, where radiation or chemical hazards can spread unpredictably and quickly, putting both personnel and civilians at risk.

AI models can simulate how a chemical plume or radioactive contamination will travel over time. For example, if a chemical spill occurs in a battlefield, AI algorithms can analyze real-time data on wind speed, direction, and terrain to forecast the movement of the chemical agents. This enables military leaders to make informed decisions, such as adjusting evacuation routes, deploying protective gear, or preparing decontamination teams ahead of time.

Similarly, AI can predict the long-term effects of radiation exposure. By analyzing historical data and environmental variables, AI models can forecast the potential health impacts of exposure, enabling military forces to prepare medical teams and resources for specific long-term effects such as radiation sickness or contamination of food and water sources.

One of the most powerful applications of AI in environmental risk assessment is its ability to provide real-time insights that enhance decision-making. In complex military environments, the speed and accuracy of decision-making are crucial. AI systems can continuously monitor

environmental conditions and provide immediate feedback to commanders and personnel, allowing them to make informed decisions in real time. For example, during a chemical attack or radiation leak, AI systems could automatically trigger contingency plans, offering commanders guidance on the best course of action.

Moreover, AI can help identify the most effective resources for mitigating environmental risks. If a radiation leak is detected, AI systems can analyze available resources, such as radiation shielding materials, decontamination supplies, and medical treatments, and recommend the most efficient allocation. AI can also predict the necessary levels of protection, depending on the severity of the hazard, and automatically alert teams to prepare the correct equipment.

In terms of operational efficiency, AI can assist military forces in dynamically adjusting operational plans to minimize exposure to radiation or chemicals. For example, AI systems could continuously monitor personnel movement and adjust strategies based on the real-time threat levels, minimizing unnecessary exposure.

Effective risk assessment involves not only identifying and mitigating immediate threats but also efficiently allocating resources in response to those risks. In military operations, the strategic allocation of limited resources—such as personnel, vehicles, equipment, and medical resources—is critical. AI can play a pivotal role in optimizing resource allocation during environmental crises, ensuring that the right resources are directed to the most pressing needs.

For instance, if a chemical leak is detected in a particular area, AI can analyze the spread of the hazard and prioritize areas that need the highest level of decontamination or medical attention. This analysis could ensure that the most contaminated areas receive immediate attention, while other less-affected areas can continue to operate without disruption. AI can also optimize the supply chain, helping to direct resources such as protective gear, decontamination materials, and medical supplies to locations where they are most needed, based on real-time data.

Additionally, AI can be used to predict future resource needs by analyzing patterns in past operations. This foresight enables military planners to preposition resources in key areas before threats occur, enhancing preparedness and reducing reaction time when a radiation or chemical hazard is detected.

AI can also significantly improve the process of reporting and documenting environmental risks during military operations. By automating the generation of environmental risk reports, AI systems can reduce the administrative burden on military personnel and ensure that critical data is accurately recorded and shared in a timely manner.

For example, AI can automatically generate and update environmental status reports, providing commanders and other key personnel with a comprehensive overview of radiation levels, chemical hazards, and mitigation efforts in real time. This automation ensures that reports are always up-to-date and reflect the latest environmental data, improving situational awareness and facilitating better decision-making.

Several military applications already demonstrate the potential of AI in environmental risk assessment:

**AI in nuclear accident response:** During the Fukushima Daiichi nuclear disaster, AI-based models could have been used to better predict radiation spread, potentially improving the evacuation plans and reducing exposure. Similarly, AI could automate real-time monitoring of radiation levels in conflict zones where traditional methods may not be feasible.

**Chemical spill detection:** AI-powered sensors are already being used in military environments to detect chemical agents. For example, systems utilizing AI-driven chemical analysis can identify toxic substances more rapidly than manual testing methods, providing military personnel with more accurate and timely data to protect both troops and civilians.

AI in automated environmental surveys: Drones and autonomous vehicles equipped with AI can perform environmental surveys in hazardous areas, collecting data on radiation or chemical contamination without putting personnel at risk. These systems can analyze data on-site, automatically adjusting their flight paths based on the detected hazard levels.

The future of AI in military environmental risk assessment looks promising, particularly as AI technologies continue to evolve. Machine learning algorithms will become more adept at predicting environmental changes and threats, while deep learning models will enhance the accuracy of detection systems. Additionally, the integration of AI with emerging technologies such as the Internet of Things (IoT) and satellite monitoring systems will allow for a more comprehensive and global monitoring system.

Furthermore, the implementation of AI in real-time environmental monitoring will enable a new level of autonomy and efficiency in managing military operations. AI systems will likely become more autonomous, capable of making quick decisions without human intervention, providing critical support in complex, fast-paced environments.

**Conclusion.** The integration of AI into military environmental risk assessments represents a significant advancement in managing radiation and chemical threats. By automating data processing, enhancing predictive capabilities, and improving decision-making, AI offers the potential to revolutionize military responses to environmental hazards. As AI technologies continue to evolve, their role in environmental security will become even more critical, helping to ensure that military forces can effectively navigate complex threats while protecting personnel and resources. The next frontier of military innovation lies in harnessing the full power of AI to create more efficient, responsive, and sustainable systems for radiation and chemical security.

## References

1. Akhundov, R. (2023). Application of means of remote radiation reconnaissance. In Modern trends in the development of information and communication technologies and management tools. Abstracts of the Thirteenth International Scientific and Technical Conference. – Kharkiv, Ukraine (Vol. 2, pp. 8-9).
2. Akhundov, R. (2024). Environmental Warfare – Modern Global Challenge. In Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference (No. 7, pp. 332-335).
3. Akhundov, R. (2024). The Environmental Consequences of Military Activity. In 20 години България в НАТО и НАТО в България (pp. 410-422). Военна академия “Г. С Раковски”.
4. Akhundov, R. G. (2023). Methods of conducting chemical exploration. Abstracts of reports of the eleventh international scientific and technical conference “Problems of informatization”. – Kharkiv, Ukraine (Vol 2, pp.104-105).
5. Akhundov, R., & Hashimov, E. (2025). Military activity and the environment: The need for a systemic approach to radiological and chemical safety. In Zdobutky ta dosyagnennya prykladnykh ta fundamental'nykh nauk XXI stolittya: Zbirnyk naukovykh prats z materialamy IX Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi (pp. 187-196). UKRLOGOS Group.  
<https://doi.org/10.62731/mcnd-16.05.2025.004>
6. Akhundov, R., & Hashimov, E. (2025). Radiation and chemical protection as a strategic priority of environmental security in the military sphere. In Zdobutky ta dosyagnennya prykladnykh ta fundamental'nykh nauk XXI stolittya: Zbirnyk naukovykh prats z materialamy IX Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi (pp. 202-209). UKRLOGOS Group.



<https://doi.org/10.62731/mcnd-16.05.2025.005>

7. Akhundov, R., & Islamov, I. (2025). Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments. Матеріали конференцій МІЦНД, (30.05. 2025; Київ, Україна), 321-329.  
<https://doi.org/10.62731/mcnd-30.05.2025.006>
8. Bayramov, A. A., & Hashimov, E. G. (2019). Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program. Advanced Information Systems, 3(1), 152-156.  
<https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.25>
9. Hashimov, E. G., & Bayramov, A. A. (2015). Detection unobserved moving armored vehicles by seismic method. National Security and Military Sciences, 1(1), 128-132.
10. Islamov, I., Akhundov, R., Dimitrov, D., & Panevski, V. (2025). Modeling of a Circular Disk Monopole Antenna Fed from a Microwave Broadband Coplanar Waveguide. Advanced Physical Research, 7(2), 184-195.  
<https://doi.org/10.62476/apr.72184>.

## ƏTRAF MÜHİTLƏ BAĞLI RİSKLƏRİN QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİNİN SÜNİ İNTELLEKT LƏ AVTOMATLAŞDIRILMASI: HƏRBİ SAHƏDƏ RADİASIYA VƏ KİMYƏVİ TƏHLÜKƏSİZLİYİN YENİ DÖVRÜ

Axundov R.Q., İslamov İ.J.

**Xülasə.** *Süni İntellekt (SI) hərbi qüvvələrin radiasiya və kimyəvi təhlükələrə necə qiymət verdiyini və onlara necə cavab verdiyini inqilab edəcək potensiala malikdir. Ənənəvi risk qiymətləndirmə üsulları tez-tez yavaş, səhv verən və sürətlə dəyişən təhdidlər qarşısında səmərəsiz olur. Bu məqalə, xüsusilə radiasiya və kimyəvi təhlükəsizlik üzrə hərbi sahələrdə ekoloji risk qiymətləndirmələrini avtomatlaşdırmaqda SI-nin tətbiqini araşdırır. SI güclü sistemlər böyük məlumat dəstlərini emal edə, təhlükələrin yayılmasını proqnozlaşdırır, qərar qəbul etməyi yaxşılaşdırır, resursların bölgüsünü optimallaşdırır və hesabat proseslərini avtomatlaşdırır. Hərbi ekoloji risk qiymətləndirmələrinə SI integrasiyası ilə qüvvələr real vaxtda ekoloji təhdidləri aşkar etmək, onlara qarşı mübarizə aparmaq və cavab vermək bacarıqlarını artıraraq əməliyyat səmərəliliyini və heyət və resursların qorunmasını yaxşılaşdırır bilər.*

**Açar sözlər:** *süni intellekt, ekoloji risk, ekoloji təhdidlər, radiasiya, kimyəvi, nüvə qəzası*

## AEROKOSMİK MONİTORİNGDƏ SÜNİ İNTELLEKTİN TƏTBİQİNİN MÖVCUD İMKANLARI VƏ PERSPEKTİVLƏR



**Binnatov M.F.**

Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan  
binnatov60@mail.ru



**Əliyeva L.İ.**

İnformasiya Texnologiyaları İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
laleasirova@mail.ru

**Xülasə:** Aviasiya və kosmik fəza texnikasını birləşdirən aerokosmos - yer atmosferində və ondan kənarda, yəni kosmosdakı uçuşlar üçün texnologiyaları öyrənən, inkişaf etdirən elm və texnologiya sahəsidir. Aerokosmik informasiya sistemi aerokosmik müşahidələrdən, peyk və ya digər aerokosmik platformalardan toplanan məlumatların yığılması, saxlanması, emalı və təhlilini təmin edir. Bu sistem peyk görüntüləri, radar məlumatları, sensor göstəriciləri və digər aerokosmik məlumatların işlənməsini təmin edir.

Məqalədə aerokosmik monitoring sahəsində informasiya-kommunikasiya texnologiyalarının (İKT) və süni intellektin (Sİ) integrasiyası nəticəsində yaranan yeni imkanlar və bu texnologiyaların strateji əhəmiyyəti ətraflı şəkildə təhlil olunur. Peyklər, pilotsuz uçuş aparatları (PUA), yüksək hündürlüklü platformalar və kosmik stansiyalar vasitəsilə toplanan peyk təsvirləri, telemetriya və meteoroloji məlumatlar böyük həcmə və müxtəlifliyə malikdir. Bu isə öz növbəsində onların effektiv idarə olunması üçün innovativ yanaşmaları da zəruri edir.

Tədqiqat işində qeyd olunur ki, Sİ texnologiyalarının - maşın təlimi, dərin öyrənmə və kompüter görmə üsullarının tətbiqi məlumatların avtomatik emalını, anomaliyaların yüksək dəqiqliklə aşkarlanmasını və proqnozlaşdırmanı mümkün edir. Aerokosmik sistemlərin təhlükəsizliyini və dayanıqlılığını artıran bu texnologiyalar real vaxt rejimində operativ qərar qəbulunu təmin edir. Eyni zamanda, sistemlərin daha dolğun və dəqiq təhlil edilməsində fərqli sensorlardan gələn məlumatların birləşdirilməsi (data fusion) texnologiyalarından istifadə olunur. Kosmik mühitin spesifik riskləri - radiasiya, elektromaqnit müdaxilələr, signal gecikmələri və kibertəhlükələr informasiya ötürülməsini daha da çətinləşdirir. Bu səbəbdən kriptografik alqoritmlərin və məlumat ötürmə protokollarının mütəmadi olaraq təkmilləşdirilməsi elmi və texnoloji baxımdan zəruri hesab olunur. Məqalədə, həmçinin Azərbaycanın bu sahədə atdığı addımlar o cümlədən Azərkosmosun dəstəyi ilə yaradılan Aerokosmik Monitoring Təlim Mərkəzinin fəaliyyəti də diqqətə çatdırılır.

Ümumilikdə, Sİ-in aerokosmik monitoringə integrasiyası əməliyyatların səmərəliliyinin artırılmasına, sistemlərin daha etibarlı və davamlı olmasına, fəvqəladə hallara operativ reaksiya verilməsinə və təhlükəsizlik tələblərinə cavab verən yeni texnoloji həllərin inkişafına töhfə verir.

**Açar sözlər:** aerokosmik monitoring, süni intellekt, aerokosmik şəbəkələrdə pilotsuz uçuş aparatları, maşın təlimi, proqnozlaşdırma, məlumatların birləşdirilməsi (data fusion), kompüter görmə.

**Giriş.** Müasir dövrdə aerokosmik şəbəkələr, xüsusilə peyklər, pilotsuz uçuş aparatları (PUA),

kosmik stansiyalar və orbitdə yerləşən digər rabitə platformaları vasitəsilə həyata keçirilən informasiya ötürülməsində süni intellekt texnologiyalarının bu sahəyə integrasiyası strateji əhəmiyyət daşıyır. Bu şəbəkələr həm mülki (meteorologiya, naviqasiya, geodeziya, telekommunikasiya) sahələrdə, həm də hərbi və təhlükəsizlik məqsədli tətbiqlərdə geniş istifadə olunur. Belə yüksək prioritetli məlumatların ötürülməsi zamanı informasiyanın məxfiliyinin, bütövlüyünün və etibarlılığının təmin olunması əsas məsələlərdən birinə çevrilmişdir.

Kosmos mühitinin radiasiya, signal gecikmələri, elektromaqnit müdaxilələr və kiberhücumlar səbəbindən bu mühitdə informasiyanın ötürülməsi yerüstü şəbəkələrlə müqayisədə daha çox texniki və təhlükəsizlik problemləri ilə üzləşir. Bu baxımdan, aerokosmik sistemlərdə istifadə olunan kriptografik alqoritmlərin və məlumatın etibarlı ötürülməsi protokollarının davamlı şəkildə təkmilləşdirilməsi elmi və praktiki cəhətdən aktualdır [1].

Bu səbəbdən “Aerokosmik monitorinqdə süni intellektin tətbiqinin mövcud imkanları və perspektivlər” mövzusu müasir elmi-texniki inkişafın çağırışlarına cavab verən və aktual problemlərin həllinə yönəlmiş mühüm bir tədqiqat istiqamətidir.

Müasir dövrdə informasiya-kommunikasiya texnologiyalarının sürətli inkişafı və kosmik sənayenin istehsalının genişlənməsi aerokosmik şəbəkələrin yeniləşməsinə və geniş tətbiq sahələrinə səbəb olmuşdur. Bildiyimiz kimi aerokosmik şəbəkələr əsasən, Yer səthindən yuxarıda yerləşən peyklər, pilotsuz uçuş aparatları, yüksək hündürlüklü platformalar (HAPs), aşağı orbitli peyklər (LEO) və digər kosmik texnoloji sistemlər arasında informasiya mübadiləsinin təmin edən mürəkkəb şəbəkə strukturları olaraq qalır. Bundan başqa bu şəbəkələr yerüstü infrastrukturla integrasiya olunaraq, qlobal miqyasda məlumat ötürülməsi, nəzarət, müşahidə və təhlükəsizlik kimi funksiyaları yerinə yetirir.

Aerokosmik şəbəkələrin əsas məqsədi müxtəlif mühitlərdə – hava, kosmos və Yer – arasında fasiləsiz, təhlükəsiz və effektiv rabitə əlaqələrini təmin edilməsidir. Bu fəaliyyətə görə onlar sadə peyk-rabitə sistemlərindən fərqlənməklə, çoxqatlı, adaptiv və şaxələndirilmiş bir infrastruktur üzərində qurulur. Şəbəkənin tərkib hissələri dinamik olaraq dəyişdiyindən və müxtəlif platformalarda yerləşə bildiyindən, onun idarə edilməsi və optimallaşdırılması üçün xüsusi protokollar, alqoritmlər və kriptografik mexanizmlər tələb olunur.

Aerokosmik şəbəkələrin texnoloji təməli bir neçə mühüm komponent üzərində qurulur. Aerokosmik şəbəkələr ənənəvi yerüstü şəbəkə modellərindən fərqli olaraq, kosmik təbəqəyə, hava təbəqəsinə və yerüstü təbəqəyə bölünür [2].

Kosmik təbəqəyə (space segment) orbitdə yerləşən peyklər (LEO, MEO, GEO) daxil olmaqla onlar geniş ərazi əhatəsini təmin edir və yüksək məlumat ötürmə sürətinə malikdirlər.

Hava təbəqəsinə (aerial segment) yüksək hündürlükdə hərəkət edən PUA-lar, aerostatlar və stratosferik platformalar daxildir. Burada mobil və elastik rabitə infrastrukturunu yaradaraq, fəvqəladə hallarda, hərbi əməliyyatlarda və uzaq bölgələrdə kommunikasiya təminatçısı kimi işlər həyata keçirilir.

Yerüstü təbəqə (ground segment) məlumatların qəbul edildiyi, emal olunduğu və idarə edildiyi əsas stansiyaları əhatə edir. Bu hissə aerokosmik sistemlə integrasiya olunmuş informasiya texnologiyaları (İT) infrastrukturunu, şəbəkə serverlərini və idarəetmə mərkəzlərini özündə birləşdirir.

Aerokosmik şəbəkələrdə məlumat ötürülməsi üçün optik və radio tezlikli (RF) rabitə texnologiyaları tətbiq edilir. RF texnologiyası aerokosmik şəbəkələrin ənənəvi və geniş yayılmış ötürmə üsulu olmaqla onun vasitəsilə məlumatlar böyük məsafələrə ötürülə bilər. Lakin tezlik diapazonunun məhdudluğu və elektromaqnit müdaxilələr bu texnologiyanın əsas çatışmayan cəhətlərinə aid edilir.

Hazırda İKT-nin inkişafı nəticəsində aerokosmik monitorinq çərçivəsində kosmik və hava-desant vasitələrindən istifadə etməklə ətraf mühitin və müxtəlif obyektlərin vəziyyəti haqqında

məlumat toplanılır, toplanmış məlumatlar təhlil edilir. Aerokosmik monitoring qərarların qəbulu, resursların səmərəli idarə edilməsi, ətraf mühitin mühafizəsi və təhlükəsizliyi, xüsusən də geniş və ya çətin əldə edilən ərazilərdə dəqiq məlumatların əldə edilməsi üçün əhəmiyyətlidir. Buna baxmayaraq, generasiya olunan məlumatların həcmi və mürəkkəbliyi, aviasiya texnikasında nasazlıqların operativ diaqnostikası, proqnozlaşdırma və proaktiv idarəetmə, mürəkkəb sistemlərin optimallaşdırılması kimi problemlər meydana çıxır. Bu kontekstdə, aerokosmik monitoringdə Sİ tətbiqləri qeyd olunan çağırışların həlli üçün səmərəli vasitədir [3].

2022-ci ildə Rəqəmsal İnkişaf və Nəqliyyat Nazirliyinin tabeliyində fəaliyyət göstərən Azərbaycan Respublikasının Kosmik Agentliyi – Azərkosmosun dəstəyi ilə Milli Aviasiya Akademiyasında Aerokosmik Monitoring Təlim Mərkəzi fəaliyyətə başlamışdır. Bu mərkəzin əsas məqsədi geoinformasiya texnologiyalarının, xüsusilə peyk şəkillərinin təhlili, rəqəmsal emal və coğrafi informasiya sistemləri sahəsində peşəkar kadrların yetişdirilməsi və bu sahədə təhsil alan tələbələrin bilik və bacarıqlarının inkişaf etdirilməsidir [4].

Aerokosmik monitoringdə Sİ verilənlərin emalı və təhlilini avtomatlaşdırır - peyk məlumatlarından istifadə edərək landşaft təsnifatına, obyektlərin sürətli şəkildə təyin edilməsinə, telemetriyada anomaliyaların aşkarlanmasına imkan verir. Bu, Sİ tərəfindən dəstəklənən proqnozlaşdırıcı analitika avadanlığının nasazlığını və təbii fəlakətləri proqnozlaşdırmağa imkan verir, proaktiv müdaxilələri müəyyən edir. Beləliklə, Sİ-in inteqrasiyası aerokosmik monitoring və mühəndislikdə əməliyyat səmərəliliyinin optimallaşdırılmasına, məlumat analizinin dəqiqliyinin artırılmasına və qərarvermə mexanizmlərinin təkmilləşdirilməsinə töhfə verir.

Həmçinin Sİ, olduqca böyük əhəmiyyətə malik olan data inteqrasiyası və analizi aerokosmik monitoringdə müxtəlif mənbələrdən gələn, fərqli formatlarda olan məlumatları vahid bir sistemdə birləşdirməyə və sonra bu birləşmiş məlumatları dərin şəkildə təhlil etməyə imkan verir.

**Aerokosmik monitoringdə toplanan məlumatlar.** Təyyarə və kosmik gəmilərdə mövcud olan müxtəlif sensor, həmçinin ölçü cihazları geniş spektrli məlumatları (temperatur, təzyiq, sürət və s.) toplayır. Bu məlumatlar əsasən üç əsas kateqoriyaya bölünür: peyk təsvirləri və uzaqdan zondlama məlumatları, telemetriya məlumatları və meteoroloji məlumatlar.

- peyk təsvirləri və uzaqdan zondlama məlumatları - peyk və PUA-lar vasitəsilə Yer səthindən, atmosferdən və kosmosdan müxtəlif növ uzaqdan zondlama məlumatları (optik, infraqırmızı, radar, hiperspektral, LIDAR təsvirləri) toplayır.
- telemetriya məlumatları - real vaxt rejimində kosmik aparatların və aviasiya sistemlərinin vəziyyəti, naviqasiyası və sensor məlumatları (temperatur, təzyiq, sürət və s.) toplanır ki, bu da uçuşun təhlükəsizliyi və sistemlərin funksional vəziyyətinin qiymətləndirilməsi üçün əsas rol oynayır.
- meteoroloji məlumatlar - atmosfer məlumatları, bulud örtüyü, qaz konsentrasiyaları və digər xarici təsirlərin öyrənilməsi məqsədilə toplanır. Bu məlumatlar uçuş təhlükəsizliyi, aerokosmik sistemlərin dayanıqlığı, kosmik şüalanma və əməliyyat şərtlərini qiymətləndirməkdə mühüm əhəmiyyətə malikdir.

Ümumilikdə, müxtəlif kateqoriyalara məxsus olan bu məlumatlar kosmik və aviasiya sistemlərinin effektiv idarə olunması və təhlükəsizliyi üçün əsas əhəmiyyətə malik amillərdir.

**Süni intellekt texnologiyalarının inteqrasiyası.** Son illər kosmik məlumatların artması və mürəkkəbləşməsi ilə hava gəmilərinin istifadəyə yararlılığı və təhlükəsizliyini qorumaq həmişəkindən daha vacib hala gəldi. Ənənəvi monitoring yanaşmalar çox vaxt rabitədə məhdudiyyətlər və gecikmələrə səbəb olur, bort elektrik təchizatı sistemində (ETS) problemlərlə mübarizə aparırdı. Sİ texnologiyalarının maşın təlimi, dərin təlim, eləcə də kompüter görmə qabiliyyətinin təkmilləşdirilməsi üsullarının aerokosmik monitoringə inteqrasiyası bu məlumatların avtomatik ön işlənməsi, anomaliyaların aşkarlanması və proqnozlaşdırma kimi funksiyaları yüksək dəqiqliklə yerinə yetirir [5].

Həmçinin, fərqli sensorlardan və informasiya sistemlərindən gələn məlumatların sintez olunmasında məlumatların birləşdirilməsi (Data fusion) üsulları geniş istifadə olunaraq Sİ modellərinə əsaslanmaqla tam və dolğun informasiya təhlilinə imkan yaradır [6].

Sİ-in tətbiqi real vaxt rejimində məlumatların avtomatik analizini mümkün edir ki, bu da operativ qərar qəbulunu sürətləndirir. Bu aerokosmik sistemlərin etibarlılığını artırmaq və fəvqəladə hallar zamanı tez müdaxilə etməyə imkan yaratmaq baxımından xüsusilə əhəmiyyətlidir.

**Aerokosmik monitoringdə Sİ-in perspektivləri.** Nəzərə almaq lazımdır ki, aerokosmik sistemlərdən gələn məlumatların heterogenliyi və həcmnin böyük olması integrasiya prosesini mürəkkəbləşdirir, onların effektiv şəkildə toplanması, saxlanması və emalını çətinləşdirir. Buna görə də, aerokosmik monitoringdə Sİ texnologiyalarının tətbiqi bir sıra əhəmiyyətli üstünlüklər təmin etsə də, qarşıda duran mühüm çağırışlar mövcuddur. Bu səbəbdən məlumatların birləşdirilməsi (Data fusion) metodlarının təkmilləşdirilməsi zəruridir [7].

Aerokosmik monitoringdə istifadə olunan məlumatların həssaslığı və təhlükəsizlik tələbləri, modellərin doğruluğu və etibarlılığının təmin olunması üçün əlavə tənzimləmələr və standartların yaradılması, bu sahədə innovativ həllərin və daha effektiv sistemlərin yaradılmasına zəmin hazırlayır.

**Nəticə və müzakirələr.** Aparılmış tədqiqatın nəticəsi olaraq, aerokosmik şəbəkələrdə məlumatın etibarlı ötürülməsi və müasir şifrələmə metodlarının tətbiqi bu sahədə təhlükəsizlik və davamlılığın əsas təminatçısı kimi mühüm rol oynadığı müəyyən edilmişdir. Aerokosmik şəbəkələrin yüksək dinamikliyə malik olması, geniş coğrafi ərazini əhatə etməsi və mühitin qeyri-sabit xarakter daşması səbəbindən burada tətbiq olunan şifrələmə və məlumat ötürmə sistemləri daha yüksək etibarlılıq və dayanıqlılıq tələb edir.

Aerokosmik mühitdə müxtəlif kateqoriyalara məxsus olan məlumatlar kosmik və aviasiya sistemlərinin effektiv idarə olunması və təhlükəsizliyi üçün əsas əhəmiyyətə malikdirlər.

Ənənəvi üsullardan fərqli olaraq süni intellektin tətbiqi real vaxt rejimində məlumatların avtomatik analizini mümkün edir ki, bu da operativ qərar qəbulunu sürətləndirir, aerokosmik sistemlərin etibarlılığını artırmaq və fəvqəladə hallar zamanı tez müdaxilə etməyə imkan yaratmaq baxımından xüsusi əhəmiyyət kəsb edir.

Aerokosmik monitoringdə istifadə olunan məlumatların həssaslığı və təhlükəsizlik tələbləri aerokosmik şəbəkələrin kənar müdaxilələrə qarşı maksimal qorunmasında xüsusi əhəmiyyət daşımaqla onun etibarlılığını təmin edir.

### Ədəbiyyat

1. Kang M, Park S, Lee Y. (2024). A Survey on Satellite Communication System Security. 24(9), 2897.  
<https://doi.org/10.3390/s24092897>
2. Məmmədov A. (2020). Aerokosmik şəbəkələrdə məlumat ötürməsinin keyfiyyətinə təsir edən amillərin modelləşdirilməsi və optimallaşdırılması. Bakı: AMEA, Fizika-Riyaziyyat və Texnika Elmləri Bölməsi.
3. Li W. (2024). The application of artificial intelligence in aerospace engineering. Appl. Comput. Eng, 35, 17-25.  
<https://doi.org/10.54254/2755-2721/35/20230353>
4. Aerokosmik Monitoring Təlim Mərkəzinin açılışı olub. (2022).  
<https://mincom.gov.az/az/media/xeberler/aerokosmik-monitorinq-telim-merkezinin-acilisi-olub1657>
5. Sanisales S, Esmaelzadeh R, Khazaee M. (2023). Artificial Intelligence Techniques for Spacecraft Health Monitoring System - A Survey. The 21st International Conference of Iranian Aerospace Society, 1-7.



[http://dl.openaccess.ir/o/ero21/ero21-02370206\\_2\\_230312144120.pdf](http://dl.openaccess.ir/o/ero21/ero21-02370206_2_230312144120.pdf)

6. Meng, T, Jing, X, Yan, Z, & Pedrycz, W. (2020). A survey on machine learning for data fusion. *Information Fusion*, 57, 115-129.  
<https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.001>
7. Varughese, S., Kayal, M., Singh, P. K., & Muthukumar, A. (2023). Challenges of multi-sensor data fusion. *Journal of Aerospace Sciences and Technologies*, 67(2A), 202–211.  
<https://www.joast.org/index.php/joast/article/view/316>

## CURRENT OPPORTUNITIES AND PROSPECTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATION IN AEROSPACE MONITORING

Binnetov M.F., Aliyeva L.I.

**Abstract.** *Aerospace, which combines aviation and space technology, is a field of science and technology that mainly focused on the study and development of technologies for flights in and beyond the Earth's atmosphere. The aerospace information system enables the collection, storage, processing and analysis of data obtained from aerospace observations, satellites or other aerospace platforms. This system processes satellite images, radar data, sensor readings and other aerospace data.*

*The article explores the emerging opportunities arising from the integration of information and communication technologies (ICT) and artificial intelligence (AI) in the field of aerospace monitoring, highlighting the strategic importance of these technologies. Satellite images, telemetry and meteorological data collected by satellites, unmanned aerial vehicles (UAVs), high-altitude platforms and space stations have a large volume and variety. This, in turn, necessitates innovative approaches for their effective management.*

*The research paper highlights that the application of AI technologies, including, machine learning, deep learning and computer vision methods enables automatic data processing, accurate detection and prediction of anomalies. These technologies increase the safety and stability of aerospace systems while providing real-time operational decision-making. Simultaneously, data fusion technologies are used to combine data from different sensors for a more complete and accurate analysis of systems. Specific risks of the space environment such as radiation, electromagnetic interference, signal delays and cyber threats - make information transmission even more difficult. Therefore, the continuous improvement of cryptographic algorithms and data transmission protocols is considered necessary from both scientific and technological perspectives. The article also explores the initiatives taken by Azerbaijan in this field, including the activities of the Aerospace Monitoring Training Center established with the support of Azercosmos. Overall, the integration of AI into aerospace monitoring contributes to increasing the efficiency of operations, making systems more reliable and resilient, providing a prompt response to emergencies and developing new technological solutions that meet safety requirements.*

**Keywords:** *aerospace monitoring, artificial intelligence, unmanned aerial vehicles in aerospace networks, machine learning, forecasting, data fusion, computer vision.*

## HƏRBİ TƏHSİLDƏ INNOVATİV YANAŞMA: SÜNİ İNTELLEKTLƏ İNTEQRASIYA OLUNMUŞ TƏLİM TEXNOLOGİYALARI



**Məmmədşadə M.Ə.**

Milli Müdafiə Universitetinin Hərbi Elmi Tədqiqat İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
mujkan@mail.ru

**Xülasə.** Bu məqalədə müasir hərbi təhsil sistemində süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının tətbiq imkanları, tədrisə təsiri və onların gələcəkdə yaratdığı perspektivlər araşdırılır. Süni intellektlə təchiz olunmuş təlim platformaları vasitəsilə simulyasiya, fərdi adaptasiya və qərar qəbul etmə bacarıqlarının inkişaf etdirilməsi məsələləri xüsusi vurğulanır. Məqsəd, bu texnologiyaların hərbi kadrlara çevik, dinamik və real şəraitə yaxın tədris imkanları təqdim etdiyini elmi əsaslarla göstərməkdir.

Həmçinin, süni intellektin hərbi təhsil sistemində inteqrasiyası ilə bağlı əsas nəzəri yanaşmalar, təlim texnologiyalarının mahiyyəti, tətbiq sahələri, üstünlükləri və qarşıya çıxan çətinliklər təhlil ediləcəkdir, müxtəlif ölkələrin təcrübəsi və Azərbaycanın hərbi təhsil sistemində bu istiqamətdə mövcud imkanlar və perspektivlər araşdırılacaqdır. Məqsəd, süni intellektin hərbi təlimdə effektiv istifadəsinin əsas elmi-pedaqoji əsaslarını üzə çıxarmaq və bu sahədə innovativ inkişaf istiqamətləri ilə bağlı tövsiyələr verməkdir.

Süni intellekt əsaslı təlim texnologiyaları, fərdi öyrənmə səviyyəsinin qiymətləndirilməsi, fərqli ssenarilər üzrə simulyasiya imkanları, interaktiv qərar qəbul etmə mexanizmləri və təkrarlanan proseslərin avtomatlaşdırılması ilə fərqlənir. Bu texnologiyalar təlimin keyfiyyətini artırmaqla yanaşı, vaxt və resurs baxımından da əhəmiyyətli qənaət təmin edir. Süni intellektin adaptiv öyrənmə modelləri vasitəsilə şəxsi bacarıqlara uyğun tədris planlarının tərtib olunması, real döyüş şəraitinə uyğun simulyasiya mühitlərinin yaradılması və risk analizlərinin aparılması, hərbi təhsilin effektivliyini və funksionallığını xeyli dərəcədə yüksəldir.

Bununla yanaşı, süni intellektin tətbiqi yalnız texnoloji üstünlük yaratmaqla kifayətlənmir, eyni zamanda pedaqoji və psixoloji aspektlərə də toxunur. Yeni nəsil hərbi kadrların formalaşmasında motivasiyaedici, çevik və adaptiv təlim metodlarının rolu danılmazdır. Hərbi təlimin müasir çağırışlara uyğunlaşdırılması, gənc zabıt və əsgərlərin bilik və bacarıqlarının müasirləşdirilməsi, yüksək peşəkarlığa malik şəxsi heyətin hazırlanması istiqamətində süni intellektlə inteqrasiya olunmuş texnologiyalar mühüm əhəmiyyət daşıyır. Gələcəkdə süni intellektin daha geniş funksionallıqla və digər texnologiyalarla sinxronlaşdırılaraq hərbi təhsildə tətbiqi bu sahədə keyfiyyət sıçrayışı üçün zəmin yaradacaqdır.

**Açar sözlər:** süni intellekt (Sİ), hərbi təhsil, inteqrasiya olunmuş təlim texnologiyaları, adaptiv öyrənmə, hərbi simulyasiya, rəqəmsal transformasiya, təlimdə innovasiya

**Giriş.** Müasir dövrdə texnologiyanın sürətli inkişafı, cəmiyyətin bütün sahələrində olduğu kimi, hərbi sahədə də əsaslı dəyişikliklərə səbəb olmuşdur. Bu dəyişikliklər, xüsusilə, hərbi təhsilin mahiyyətinə, metodologiyasına və məqsədlərinə birbaşa təsir göstərməkdədir. Qloballaşan təhlükəsizlik mühiti, qeyri-ənənəvi təhdidlərin artması, müharibə anlayışının dəyişməsi və informasiya texnologiyalarının hərbi strategiyalara inteqrasiyası ordu və təhlükəsizlik qüvvələrinin hazırlıq səviyyəsinə yeni tələblər irəli sürür. Bu kontekstdə süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının hərbi təlim və təhsildə tətbiqi müasir innovativ yanaşmaların əsas istiqamətlərindən birinə çevrilmişdir.

Ənənəvi hərbi təlim modelləri uzun illər ərzində uğurla tətbiq olunsada, dəyişən döyüş

reallıqları və texnoloji mühit bu modellərin effektivliyini məhdudlaşdırmağa başlamışdır. Müasir müharibələrdə real vaxtlı qərar qəbuletmə, böyük məlumatların (Big Data) analizi, dronlar və robot texnikasından istifadə, kiber müharibə və informasiya müharibəsi kimi anlayışlar ön plana çıxmışdır. Bu yeni çağırışlar qarşısında hərbi personalın təlim-tərbiyəsi, yalnız fiziki və taktiki bacarıqlarla məhdudlaşmamalı, eyni zamanda strateji düşüncə, informasiya emalı və texnoloji savadlılıq da əhatə olunmalıdır. Bu məqsədlə süni intellektin tətbiq olunduğu təlim texnologiyaları, hərbi təhsil sistemində inqilabi dəyişikliklərin başlanğıcı kimi qiymətləndirilə bilər.

**Metodlar.** Süni intellekt, insanın intellektual funksiyalarını – öyrənmə, düşünmə, qərar vermə, planlaşdırma və s. – texnoloji sistemlər vasitəsilə təqlid etməyə yönəlmiş elmi sahədir. Bu texnologiyanın əsas komponentlərinə maşın öyrənməsi, neyron şəbəkələr, dərin öyrənmə, təbii dilin emalı və ekspert sistemləri daxildir. Təlim texnologiyaları isə tədris prosesinin səmərəli təşkili, təlim nəticələrinin yüksəldilməsi və öyrənənin fəallığının artırılması üçün istifadə edilən metod və vasitələrin məcmusudur.

Süni intellekt əsaslı təlim texnologiyaları, hərbi təhsildə adaptiv öyrənmə modellərinin, virtual reallıq və artırılmış reallıq simulyasiyalarının, avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə sistemlərinin və ağıllı təhlil mexanizmlərinin tətbiqini nəzərdə tutur. Bu texnologiyalar, fərdi və qrup şəklində öyrənmənin optimallaşdırılmasına, təlim məlumatlarının real vaxtda emalına və təlim iştirakçılarının fəaliyyətinə dair dəqiq analitik nəticələrin əldə edilməsinə imkan yaradır.

Süni intellekt (Sİ) son onilliklərdə elmi-texniki tərəqqinin önündə gedən sahələrdən biri kimi xüsusilə strateji əhəmiyyət kəsb edən sahələrdə – o cümlədən hərbi təlim və təhsildə – geniş tətbiq imkanları ilə fərqlənir. Ümumi olaraq süni intellekt insan düşüncəsini, öyrənmə qabiliyyətini, qərar vermə mexanizmlərini və davranış modellərini təqlid edə bilən və ya bu funksiyaları avtomatlaşdırılmış şəkildə həyata keçirən kompüter sistemlərinin və alqoritmlərin məcmusudur [1]. Bu texnologiya, xüsusilə informasiya axınının sürətləndiyi və qeyri-ənənəvi təhlükələrin artdığı bir zamanda, qərar qəbuletmədə operativlik və effektivlik baxımından əvəzsiz imkanlar yaradır.

Hərbi təhsildə süni intellektin tətbiqi isə yalnız texniki biliklərin deyil, eyni zamanda pedaqoji və strateji düşüncə sistemlərinin də yenidən qurulmasını tələb edir. Burada əsas məqsəd, müasir döyüş və təhlükəsizlik mühitinə uyğun olaraq zabıt və əsgərlərin analitik təfəkkürünün inkişaf etdirilməsi, döyüş hazırlığının yüksəldilməsi və operativ qərarvermə bacarıqlarının gücləndirilməsidir [2]. Süni intellekt bu mənada təkcə texnoloji yenilik deyil, eyni zamanda təlim-tədris prosesində dərin transformasiya vasitəsidir.

Təlim texnologiyaları dedikdə, tədris prosesində istifadə olunan metodlar, vasitələr və sistemlərin ümumiləşdirilmiş məcmusu nəzərdə tutulur. Bu texnologiyalar təlimin effektivliyini artırmaq, təlim iştirakçılarının fəallığını yüksəltmək və öyrənmə nəticələrini optimallaşdırmaq məqsədi daşıyır [3]. Ənənəvi təlim texnologiyaları artıq yeni dövrün ehtiyaclarına tam cavab vermədiyi üçün, süni intellektlə inteqrasiya bu sahədə əsas inkişafa səbəb olmuşdur.

Süni intellekt əsaslı təlim texnologiyaları, əsasən aşağıdakı komponentlər üzrə qurulur:

1. Adaptiv öyrənmə sistemləri (Adaptive learning systems): Bu sistemlər təlim iştirakçısının fərdi bilik səviyyəsinə, bacarığına və öyrənmə sürətinə uyğun olaraq tədris materiallarını avtomatik şəkildə tənzimləyir. Nəticədə, hərbi təhsil alan şəxs öz fərdi ehtiyaclarına uyğun təlim alır və zəif olduğu sahələrdə daha intensiv məşğələlərə cəlb olunur [4].
2. Simulyasiya və modelləşdirmə texnologiyaları: Süni intellektlə inteqrasiya olunmuş virtual və artırılmış reallıq (VR/AR) texnologiyaları vasitəsilə müxtəlif döyüş ssenariləri modelləşdirilir. Beləliklə, hərbi personal real döyüş şəraitində rast gələcəyi qərar vermə və reaksiya situasiyalarını əvvəlcədən təcrübə edə bilər [5]. Bu, psixoloji dözümlülüyün artırılması və təlimin real döyüşə yaxınlaşdırılması baxımından əhəmiyyətlidir.
3. Ekspert sistemləri və avtomatlaşdırılmış analiz: Süni intellekt əsasında çalışan ekspert sistemləri təlim prosesində real vaxtda iştirakçıların fəaliyyətini qiymətləndirə, zəif

cəhətləri aşkar edə və fərdi tövsiyələr təqdim edə bilər [6]. Bu cür sistemlər eyni zamanda təlimdə toplanan böyük həcmli məlumatları emal edərək statistik və davranış əsaslı analizlər aparmağa imkan yaradır.

4. Ağıllı tutor sistemləri (Intelligent tutoring systems): Bu sistemlər tədris prosesini müəllimin nəzarətinə ehtiyac qalmadan fərdi şəkildə idarə edə bilər. Məsələn, kursantların öyrənmə davranışlarına uyğun olaraq test sualları, praktik tapşırıqlar və simulyativ vəziyyətlər təqdim olunur [7].

Bu texnologiyaların hərbi sahədə tətbiqi, yalnız biliklərin verilməsi ilə məhdudlaşmır, həm də praktiki bacarıqların formalaşdırılması, təhlil və planlaşdırma qabiliyyətlərinin inkişafı, stres altında qərar vermə kimi kompleks vərdişlərin təliminə yönəlmişdir.

Dünyanın aparıcı dövlətləri süni intellektlə inteqrasiya olunmuş təlim texnologiyalarını artıq öz hərbi təhsil sistemlərinə tətbiq etmişdir. Məsələn, ABŞ Müdafiə Nazirliyi "Project Maven" çərçivəsində süni intellekt vasitəsilə təlim modullarının optimallaşdırılmasını həyata keçirir. Bu sistem pilotsuz uçuş aparatları ilə toplanan vizual məlumatların avtomatik analizini təmin edir və eyni zamanda operatorların qərar qəbul etmə bacarıqlarını artırmaq üçün real vaxtlı təlim proqramları təqdim edir [8].

İsrail ordusu isə kibertəhlükəsizlik və elektron müharibə sahəsində kursantlara interaktiv simulyasiya texnologiyaları ilə təlim keçir, burada süni intellekt real kiberhücum ssenarilərinin idarə olunmasında istifadə olunur [9]. Çin və Rusiya kimi ölkələr də bu sahəyə böyük maliyyə və elmi resurslar ayıraraq süni intellektin hərbi təlim sahəsində tətbiqini prioritet istiqamət kimi müəyyənləşdirmişdir [10].

Süni intellektlə təchiz olunmuş təlim texnologiyaları aşağıdakı üstünlükləri ilə seçilir:

- Təlimin fərdiləşdirilməsi və fərqli bacarıqlara uyğunlaşdırılması;
- Realistik və riskdən uzaq simulyasiya mühitlərinin yaradılması;
- Davamlı monitorinq və obyektiv qiymətləndirmə imkanları;
- Öyrənmə prosesində motivasiyanın artırılması;
- Resurslara qənaət və təlim vaxtının optimallaşdırılması.

Bu texnologiyalar insan faktoru ilə bağlı təlimdə qarşıya çıxan subyektivliyi azaldır və təlimin keyfiyyətini yüksəldir. Bununla yanaşı, insan davranışının, düşüncə tərzinin və təlim mühitində psixoloji faktorların süni intellektlə uyğunlaşdırılması məsələləri hələ də araşdırma tələb edən istiqamətlərdən biri olaraq qalmaqdadır.

**Nəticə və müzakirələr.** Süni intellektin (Sİ) hərbi təlim və təhsil sahəsində tətbiqi, müasir dövrdə baş verən texnoloji transformasiyaların tərkib hissəsi olaraq yalnız texniki innovasiya deyil, həm də strateji və pedaqoji yenilənmə vasitəsidir. Hərbi sahədə baş verən dəyişikliklər – döyüş meydanlarının rəqəmsallaşması, kiber təhlükələrin artması, pilotsuz texnologiyaların yayılması və qeyri-ənənəvi münaqişə modellərinin genişlənməsi – hərbi personalın hazırlıq səviyyəsinə və təlimin strukturuna yeni tələblər qoyur. Bu kontekstdə süni intellektlə inteqrasiya olunmuş təlim texnologiyalarının rolu əvəzolunmazdır.

Məqalədə aparılan təhlil göstərdi ki, süni intellekt əsaslı təlim sistemləri fərdi öyrənməyə imkan yaradan adaptiv mexanizmlər, real döyüş şəraitinə yaxınlaşdırılmış simulyasiya proqramları, avtomatlaşdırılmış təhlil və qiymətləndirmə sistemləri vasitəsilə təlimin keyfiyyətini və effektivliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Bu texnologiyalar sayəsində zabıt və əsgərlər müxtəlif taktiki vəziyyətlərə daha tez uyğunlaşır, qərar vermə qabiliyyətləri inkişaf edir və psixoloji davamlılıqları artır.

Süni intellektin tətbiqi ilə təlim fərdiləşdirilir, öyrənənin təlim prosesində aktiv iştirakı təmin edilir və zəif bacarıqların erkən mərhələdə aşkar olunaraq fərdi tədris planlarının hazırlanması mümkün olur. Beləliklə, öyrənmə yalnız informasiya ötürülməsi ilə məhdudlaşmır, eyni zamanda analitik və tənqidi düşüncə, davranış strategiyaları və döyüş simulyasiyaları vasitəsilə hərbi

peşəkarlıq səviyyəsinə çatdırılır. Bütün bunlar, süni intellektin yalnız texnoloji innovasiya deyil, həm də müasir hərbi-pedaqoji sistemin ayrılmaz komponentinə çevrildiyini təsdiq edir.

Lakin süni intellektin hərbi təhsildə tətbiqi ilə bağlı müəyyən çətinliklər və məhdudiyyətlər də mövcuddur. Bunlar arasında texnoloji infrastrukturun natamamlığı, müəllim heyətinin və kursantların rəqəmsal savadlılıq səviyyəsinin qeyri-bərabərliyi, informasiya təhlükəsizliyi və etik məsələlər xüsusi yer tutur. Süni intellektin öyrənənin davranış və fəaliyyətini izləyərək qərarlar verməsi məsələsi, şəxsi məlumatların qorunması və insan faktorunun dəyərinin azaldılması ilə bağlı suallar doğurur. Bu səbəbdən süni intellektin tədris prosesinə inteqrasiyası zamanı hüquqi, etik və psixoloji yanaşmalar da nəzərə alınmalıdır.

Bununla yanaşı, hərbi təhsil müəssisələrində süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi üçün bir neçə istiqamət üzrə tövsiyələr irəli sürmək mümkündür:

1. Tədqiqat və təhlil: Süni intellektin hərbi təlimə təsiri ilə bağlı lokal və beynəlxalq tədqiqatların təşkili, uyğun model və platformaların seçilməsi.
2. Texnoloji infrastrukturun qurulması: Rəqəmsal simulyasiya otaqları, VR/AR laboratoriyaları və süni intellekt platformalarının yaradılması.
3. Kadr hazırlığı: Müəllim və təlimçilərin Sİ əsaslı tədris texnologiyalarından istifadə üzrə sistemli şəkildə ixtisasartırma kurslarına cəlb olunması.
4. Etik və hüquqi yanaşma: Təlimdə şəxsi məlumatların istifadəsi və tədrisin avtomatlaşdırılması ilə bağlı etik normaların və qanunvericiliyin inkişaf etdirilməsi.
5. Adaptiv təhsil proqramları: Sİ-nin imkanlarını nəzərə alan yeni kurikulumların hazırlanması və tətbiqi.

Nəticə etibarilə, süni intellekt texnologiyalarının hərbi təhsil sisteminə inteqrasiyası təlim prosesinin fərdiləşdirilməsi, çevikləşdirilməsi və texnoloji cəhətdən zənginləşdirilməsi baxımından böyük perspektivlər açır. Bu, yalnız müasir hərbi reallıqlara uyğun peşəkar kadrların hazırlanmasını deyil, həm də təhlükəsizlik və müdafiə sistemlərinin dayanıqlılığını təmin edən strateji məsələ kimi dəyərləndirilməlidir. Gələcəkdə süni intellektin daha geniş funksionallıqla və digər texnologiyalarla sinxronlaşdırılaraq hərbi təhsildə tətbiqi bu sahədə keyfiyyət sıçrayışı üçün zəmin yaradacaqdır.

### Ədəbiyyat

1. Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson.
2. Piriye H.K., Həşimov E.Q., Hərbi təhsildə təlim metodları. Bakı: Hərbi Nəşriyyat, 2016. 55 s.
3. Selevko, G. K. (2006). *Pedagogical Technologies: Textbook for Higher Education*. Moscow: Public Education Publishing.
4. Chen, X., Zou, D., Cheng, G., & Xie, H. (2020). Detecting latent topics and trends in educational technologies over four decades using structural topic modeling: A retrospective of all volumes of *Computers & Education*. *Computers & Education*, 151.
5. Salcedo, J. N., Nagashima, K., & Johnson, W. L. (2022). The effectiveness of immersive virtual environments for military training. *Military Psychology*, 34(1), 21–34.
6. Buchanan, B. G., & Shortliffe, E. H. (1984). *Rule-Based Expert Systems: The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project*.
7. VanLehn, K. (2011). The relative effectiveness of human tutoring, intelligent tutoring systems, and other tutoring systems. *Educational Psychologist*, 46(4), 197–221.
8. Kania, E. B. (2019). *Battlefield Singularity: Artificial Intelligence, Military Revolution, and China's Future Military Power*. Center for a New American Security.
9. Heumann, S. (2020). *AI in Military Use: Risks and Governance*. Stiftung Neue Verantwortung.



10. Allen, G. C., & Chan, T. (2017). *Artificial Intelligence and National Security*. Harvard Kennedy School, Belfer Center for Science and International Affairs.

## INNOVATIVE APPROACH TO MILITARY EDUCATION: TEACHING TECHNOLOGIES INTEGRATED WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Mammadzada M.A.

**Abstract.** *This article examines the application possibilities of artificial intelligence (AI) technologies in the modern military education system, their impact on teaching, and the prospects they create in the future. Special emphasis is placed on the issues of simulation, individual adaptation, and development of decision-making skills through training platforms equipped with artificial intelligence. The goal is to show on scientific grounds that these technologies provide flexible, dynamic, and realistic training opportunities for military personnel.*

*Also, the main theoretical approaches to the integration of artificial intelligence into the military education system, the essence of training technologies, areas of application, advantages, and challenges will be analyzed, the experience of various countries and the existing opportunities and prospects in this direction in the military education system of Azerbaijan will be examined. The goal is to reveal the main scientific and pedagogical foundations of the effective use of artificial intelligence in military training and to provide recommendations on innovative development directions in this area.*

*Artificial intelligence-based training technologies are distinguished by the assessment of individual learning levels, simulation capabilities for different scenarios, interactive decision-making mechanisms, and automation of repetitive processes. These technologies not only improve the quality of training, but also provide significant savings in terms of time and resources. Through adaptive learning models of artificial intelligence, the development of curricula tailored to personal skills, the creation of simulation environments tailored to real combat conditions, and the conduct of risk analyses significantly increase the effectiveness and functionality of military education.*

*At the same time, the application of artificial intelligence is not only limited to creating technological advantages, but also touches on pedagogical and psychological aspects. The role of motivating, flexible and adaptive training methods in the formation of a new generation of military personnel is undeniable. Technologies integrated with artificial intelligence are of great importance in adapting military training to modern challenges, modernizing the knowledge and skills of young officers and soldiers, and preparing highly professional personnel. In the future, the application of artificial intelligence in military education with wider functionality and synchronization with other technologies will create the basis for a qualitative leap in this area.*

**Keywords:** *artificial intelligence (AI), military education, integrated learning technologies, adaptive learning, military simulation, digital transformation, innovation in training*

## AVIASİMULYATORLARDA SÜNİ İNTELLEKTİN TƏTBİQİ İLƏ TƏLİM PROSESİNİN AVTOMATLAŞDIRILMASI VƏ OPTİMAL QƏRARLARIN SEÇİLMƏSİ



**Mirzayev İ.Ə.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
imirzayev@naa.edu.az

**Xülasə.** Müasir dövrdə texnologiyaların sürətli inkişafı təlim proseslərinə də əhəmiyyətli təsir göstərmişdir. Aviasiya sahəsində pilot hazırlığı üçün istifadə edilən aviasimulyatorlar bu baxımdan mühüm rol oynayır. Son illərdə isə süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının bu sahəyə integrasiyası təlim prosesinin avtomatlaşdırılması və səmərəliliyinin artırılması baxımından yeni imkanlar açmışdır. Bu məqalədə süni intellekt texnologiyalarının aviasimulyatorlarda təlim prosesinin avtomatlaşdırılması üzrə rolu, üstünlükləri, çatışmazlıqları, maliyyə tələbləri və gələcək perspektivləri müzakirə ediləcəkdir.

**Açar sözlər:** süni intellekt, aviasimulyator, təlim prosesi, təlimatçı, uçuş heyəti

**Giriş.** Aviasiya təhlükəsizliyi və effektivliyi üçün pilotların peşəkar və real şəraitə uyğun təlim almaları zəruridir [1]. Ənənəvi təlim metodları isə həm bahalı, həm də məhdud çeviklik imkanlarına malikdir [2]. Süni intellekt texnologiyalarının təlim prosesinə daxil edilməsi, fərdi yanaşmanı təmin etməklə yanaşı, təkrar olunan məşqlərin avtomatik qiymətləndirilməsi və adaptiv senarilərin qurulması imkanlarını artırır [1,3]. Xüsusilə, pandemiya dövründə məsafədən təlim imkanlarının genişlənməsi Sİ texnologiyalarına marağı daha da artırmışdır [4].

Qeyd olunan məqalədə, müxtəlif faktor, göstəricilər, mövcud süni intellekt modelləri və onların reallaşdırılması mexanizmləri nəzərə alınmaqla, aviasimulyatorlarda tətbiq edilməsinin üstünlük və çatışmazlıqları qeyd olunub [5].

**Süni intellekt tətbiqinin üstünlükləri.** Süni intellektin aviasimulyatorlarda tətbiqi aşağıdakı üstünlükləri təmin edə bilər:

1. Fərdi təlim – Hər bir uçuş heyəti üzvünün bacarıq səviyyəsinə uyğun adaptiv təlim senariləri yaradılır.
2. Avtomatik qiymətləndirmə – Təlim prosesində edilən səhvlər real vaxtda analiz edilərək qiymətləndirmə aparılır [3].
3. Real simulyasiya – Süni intellekt tərəfindən yaradılan dinamik və dəyişən hava şəraiti, təcili hallar kimi vəziyyətlər real təcrübəyə daha yaxın təlim imkanları yaradır [2].
4. Məlumatların toplanması və analizi – Təlim nəticələri sistemə şəkildə toplanır və analitik hesabatlar hazırlanır [5].
5. Təlim resurslarının optimallaşdırılması – İnsan təlimçilərin yükü azalır və daha çox pilot paralel olaraq təlim keçə bilər [4].

**Süni intellekt tətbiqinin çatışmazlıqları.** Bununla belə, süni intellektin tətbiqi ilə bağlı bəzi çətinliklər və risklər də mövcuddur:

1. Etibarlılıq – Süni intellektin verdiyi qərarların düzgünlüyü və təhlükəsizliyi bəzən insan mühakiməsi ilə müqayisədə zəif ola bilər [1].
2. Texniki problemlər – Sİ texnologiyalarının düzgün integrasiyası üçün yüksək texniki bilik və infrastruktur tələb olunur [2].

3. İnsan faktorunun azalması – Tam avtomatlaşdırma bəzən pilotların real situasiyalarda müstəqil qərar vermə bacarıqlarını zəiflədə bilər [3].
4. Etik və hüquqi problemlər – Sİ qərarlarının nəticəsində baş verə biləcək qəzalar və ya səhvlər üzrə məsuliyyətin təyini problemli ola bilər [4].

Süni intellektin aviasimulyator sistemlərinə integrasiyası ilkin mərhələdə yüksək maliyyə vəsaiti tələb edir. Bu xərclərə aşağıdakılar daxildir:

- Süni intellekt proqram təminatının hazırlanması və ya alınması;
- Məlumatların toplanması və emalı üçün infrastrukturun qurulması;
- IT mütəxəssislərinin və təlimçilərin hazırlanması;
- Təhlükəsizlik və test sistemlərinin qurulması. Lakin uzunmüddətli perspektivdə bu xərclər özünü doğruldur, çünki təlim resurslarına qənaət edilir və təlimin keyfiyyəti artır.

**Perspektivlər.** Gələcəkdə süni intellektin tətbiqi ilə:

- Tam adaptiv və fərdi təlim proqramları inkişaf etdiriləcək [3];
- Virtual və artırılmış realıq texnologiyaları ilə integrasiya təmin ediləcək [2];
- Beynəlxalq təlim standartlarına uyğunlaşdırılmış global təlim platformaları yaradılacaq [4];
- Uçuş heyəti üzvlərinin psixoloji vəziyyətinin təhlili və stres menecmenti kimi qeyri-texniki bacarıqlar da avtomatlaşdırılmış təlimə daxil ediləcək [5].

Süni intellekt texnologiyalarının uğurlu tətbiqi üçün aşağıdakı addımlar vacibdir:

1. Pilot layihələrin həyata keçirilməsi və ilkin nəticələrin analizi;
2. Milli və beynəlxalq aviasiya qurumları ilə əməkdaşlıq;
3. Süni intellektə dair etik və hüquqi çərçivələrin hazırlanması;
4. Universitetlər və tədqiqat mərkəzləri ilə birgə elmi-texniki layihələrin reallaşdırılması;
5. Süni intellekt sistemlərinin mütəmadi yenilənməsi və optimallaşdırılması.

Süni intellekt texnologiyalarının aviasimulyatorlarda təlim prosesinə integrasiyası aviasiya təlimində inqilabi dəyişikliklərə səbəb ola bilər. Doğru tətbiq olunduqda bu texnologiyalar pilot hazırlığını daha səmərəli, təhlükəsiz və müasir standartlara uyğun hala gətirə bilər. Əldə edilən üstünlüklər uzunmüddətli baxışda bu texnologiyanın tətbiqini zəruri və məqsədəuyğun edir.

**Nəticə.** Mövcud süni intellekt modelləri və onların ölçətanlıq dərəcələri nəzərə alınaraq nəticə olaraq qeyd etmək istərdim ki, hazırdakı modellərin tətbiqi ilə təlim prosesinin tam avtomatlaşdırılması və insan – təlimatçını tam şəkildə əvəz edə biləcək və real zaman şəraitində təlim prosesini analiz edib, optimal qərar qəbul edəcək məqsədəuyğun model mövcud deyil. Təlim prosesinin avtomatlaşdırılması və ən optimal qərarların seçilməsi üçün, marketing cəhətdən xərcləri çox böyük olsa da məxsusi modelin hazırlanması daha məqsədəuyğundur. Çünki bu modelin hazırlanması, insan faktorunun təsir edə biləcəyi məsələləri aşaraq, bilik bazası əsasında daha doğru analiz və optimal qərarların çıxarılmasına və daha dəqiq nəticə əldə olunmasına yardımçı olacaq.

### Ədəbiyyat

1. Stuart Russell & Peter Norvig (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th Edition). Pearson.  
<https://aima.cs.berkeley.edu>
2. Christopher D. Wickens & Justin G. Hollands (2019). Engineering Psychology and Human Performance. Routledge.  
<https://www.routledge.com/Engineering-Psychology-and-Human-Performance/Wickens-Hollands/p/book/9781138544018>

3. International Civil Aviation Organization (2013). Manual of Evidence-Based Training (Doc 9995). ICAO.  
<https://www.icao.int/safety/airnavigation/Pages/training-guidance-documents.aspx>
4. Charles Hodges, Stephanie Moore, Barbara Lockee, Torrey Trust & Aaron Bond (2020). The Difference Between Emergency Remote Teaching and Online Learning. EDUCAUSE Review.  
<https://er.educause.edu/articles/2020/3/the-difference-between-emergency-remote-teaching-and-online-learning>
5. Gilbert Mwansa, M. R. Ngand & Z. S. Dasi (2024). Enhancing Practical Skills in Computer Networking: Evaluating the Unique Impact of Simulation Tools. Education Sciences, 14(10), 1099.  
<https://doi.org/10.3390/educsci14101099>.

### **AUTOMATION OF THE TRAINING PROCESS AND SELECTION OF OPTIMAL DECISIONS THROUGH THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN FLIGHT SIMULATORS**

Mirzayev I.A.

**Abstract.** *In today's rapidly evolving technological landscape, training processes have undergone significant transformation. In the field of aviation, flight simulators play a crucial role in pilot education and preparation. In recent years, the integration of artificial intelligence (AI) technologies into these systems has opened up new possibilities for automating and enhancing the efficiency of training. This article discusses the role of AI in automating the training process within aviation simulators, examining its advantages, limitations, financial requirements, and future prospects.*

**Keywords:** *artificial intelligence, flight simulator, training process, instructor, flight crew*

## RELIABILITY OF INTELLIGENT FIREARMS SHOOTING SIMULATORS



**Huseynov N.E.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
namig.huseynov@naa.edu.az



**Dadashov F.H.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
fdadashov@naa.edu.az



**Hasanov H.B.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
huseyn.hasanov@naa.edu.az

**Abstract.** Intelligent firearms training simulators are becoming an essential tool in military training, medicine, and education. However, their widespread adoption requires dependable reliability. The main challenges are related to the need for minimal response delay, high accuracy of visualization and ballistic calculations, stable operation of hardware and software, and protection of trainee data. The proposed architecture integrates a ballistic module, biometric monitoring, and an expert system, ensuring repeatability and reproducibility of training results. The tests show that the system is capable of simulating shooting in real-time with minimal delays, high accuracy, and fault tolerance, which confirms its practical value for training law-enforcement personnel. Profiling results demonstrate that the critical path from sensor input to visualization consistently remains within a stable frame budget of approximately ~32.5 ms, ensuring effective performance at ~30 FPS and deterministic integration of projectile trajectories. The system maintains functionality under temporary failures of sensors or communication, ensuring uninterrupted training sessions. These findings demonstrate that reliable, real-time ballistic simulation can be achieved on affordable hardware, offering a robust platform for skill transfer, scenario experimentation, and objective performance evaluation in defense and security domains.

**Keywords:** intelligent simulator, reliability, virtual reality, sensory processing, training systems

**Introduction.** Intelligent shooting simulators based on VR/AR and AI are rapidly entering the practice of force and military training, enabling complex tactical scenarios to be executed with controlled risks and objective performance metrics [1,2]. At the same time, the key condition for the effectiveness of such systems is their reliability: the validity of the acquired skills, their transferability to real conditions, and instructors' trust in digital assessment directly rely on it [3].

From an engineering perspective, the reliability of shooting simulators is determined by a set of strict requirements. First, the minimum response delay: the shooter's procedural actions and visual-auditory feedback must be synchronized in near real-time exceeding the "motion-to-photon"



threshold worsens behavioral performance and increases the risk of motion sickness, which distorts learning [4,5]. Modern methods of precision measurement and profiling of delays (including high-speed video recording of the controller trajectory and phase decomposition of latency) allow introducing quantitative target values for the design of simulators [4], reviews of QoE for interactive VR record the relationship of latency, frame stability, and realism with training outcomes [6].

High accuracy of visualization and ballistic calculations is essential for reproducible skill assessment. For reproducible skill assessment, trajectory simulation must take into account external flight ballistics and be confirmed numerically and experimentally. The work carried out includes a ballistic model that performs calculations in real-time based on external system parameters [7].

Together, these requirements set the framework for this paper: we develop an architectural and algorithmic approach to creating an intelligent shooting training system focused on low latency, accurate and verifiable ballistics, fault-tolerant tracking, secure data processing, and reproducible metrics. In the remainder of the paper, we describe the architecture, reliability assurance methods, and prototype validation results on reactivity, accuracy, and fault tolerance tasks [2]. Unlike existing simulators that often simplify ballistic models or lack redundancy, this study introduces a hybrid dual-sensor architecture with secure logging and adaptive numerical integration to ensure reliability under real-time constraints.

**Methods.** The system being developed is a cyber-physical circuit "sensors → processing → simulator → visualization", designed to meet the requirements of minimum latency, high ballistic accuracy, failure resistance and reproducibility of results. The hardware includes a mock-up of the RPG-7V2 with an installed BNO055 inertial module hardware sensor-fusion, orientation output in Euler angles and an infrared laser pointer coaxial with the barrel at a wavelength of 850 nm. A  $2.5 \times 2.5$  m projection surface is used in the room: the projector forms a simulator scene on the board, and a calibrated camera aimed at the same plane continuously observes the IR spot. A PC runs two interconnected processes: the game engine (simulator) and the Python application working with the video stream. A real-time Python process extracts the IR spot (NIR threshold segmentation, noise suppression, subpixel centroid/Gaussian centering). When a "shot" event occurs, the process generates a data packet with the [u,v] coordinate of the mark and a timestamp. The packet is sent over a local software socket to the engine; in parallel, the engine receives the current weapon orientation from BNO055, computes launch initial conditions—direction, elevation, and offsets due to recoil, integrates the trajectory, visualizes the shot and records the hit. An overview of the system is shown in Figure 1.

The key element is the metric binding of optical measurements to the simulator scene. At the calibration stage, the internal parameters of the camera (distortion, focus) are estimated, planar calibration of the projection surface is performed, after which a homography  $H$  is constructed between the board plane and the coordinate system of the virtual scene. This allows the observed coordinate [u,v] to be mapped to physical [x, y] on the target plane with a known scale (through  $2.5 \times 2.5$  m) and then into the scene's world coordinates. Time synchronization is enforced across all data sources: the IMU, camera and engine use consistent monotonic clocks; both local marks and offsets of relative timers are saved in the logs, which ensures a correct reconstruction of the sequence of events during analysis.

The processing pipeline is built non-blocking: video frames are processed in a separate Python loop with non-blocking queues, socket transmission is asynchronous, and in the game engine, shot events and orientation reading are processed by a priority thread separated from the background logic/IO. This decomposition minimizes the total latency along the critical path from movement to visualization, while reducing jitter. Degradation modes are provided for stability: in case of temporary loss of the optical mark, the system falls back to the inertial direction estimate. In

case of IMU failures, the optical aiming vector inferred from the marker dynamics is used, in case of short-term communication failures, packets are buffered and delivered when the channel is restored. The survivability of the circuit is increased by periodic self-diagnostics (health-check of camera modules, IMU, socket, engine) and a “warm” restart mechanism with preservation of calibration parameters.

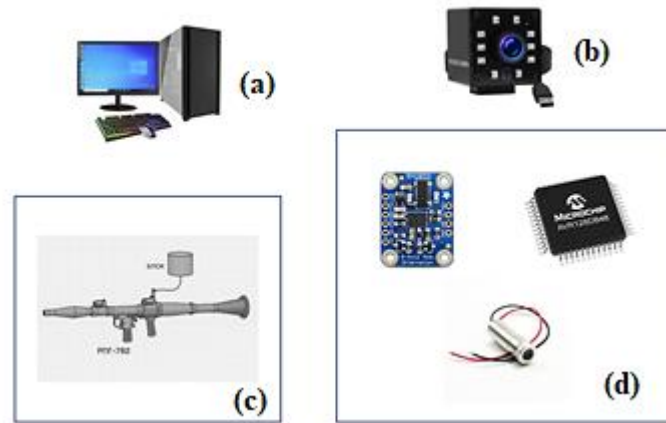


**Figure 9.** Architecture of the intelligent shooting simulator system.

The engine's ballistic module calculates external ballistics taking into account gravity, drag (tabular or calibrated  $C_d$  (Ma)), crosswind and gusts; precise (RK4) and adaptive (RK45) schemes are used for integration, selected based on the frame time budget. Each shot undergoes two-way validation: the predicted impact point is compared with the measured  $[x,y]$  from the board; accumulated discrepancies are analyzed offline to calibrate the wind model and drag parameters. The following metrics are supported for quality assessment: trajectory RMSE. Confidence intervals of flight time, as well as indicators of the stability of training results (ICC/SEM) in repeated sessions.

The data pipeline and reproducibility are built into the architecture. All events are IMU orientation angles, frame coordinates and their transformations, camera and projector calibration parameters, network latency, BNO055 firmware version, Python code version, and scene build are logged to an immutable log with a hash chain. Access to the logs is role-based, data is tagged with trainee pseudonyms, and the storage supports a policy of retention and export of anonymized datasets for analysis. For reproducibility, each session captures a “snapshot of the environment”: engine versions, scenarios, ballistic parameters, H matrix, video processing settings, and sample rates. This allows experiments to be repeated verbatim, results to be compared between sessions and sites, and regression tests to be performed after updates. The user interface is illustrated in Figure 2 and Figure 3.



**Figure 2** Unity main menu of the simulator

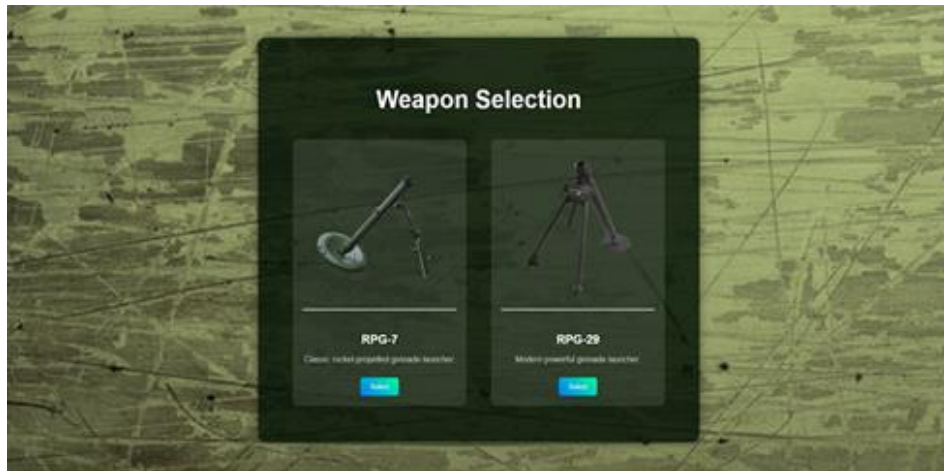


**Figure 10** Weapon-selection menu in Unity

The architecture thus closes two complementary measurement branches in one loop — inertial (BNO055) and optical (850 nm IR tag with camera) — and brings them together in the simulator via a lightweight event channel. The 2.5 x 2.5 m projection scene provides a stable metric system, and the software two-component organization (engine + Python tracker) shares responsibility for physics/visualization and for data capture/conversion. The chosen solutions for calibration, time synchronization, stream prioritization, and degradation modes directly support the requirements of minimal response delay, ballistic calculation accuracy, hardware and software stability, log security, and training metrics repeatability.

**Results and discussion.** Profiling the simulator's work scene see Figure 4 confirms that the critical path "sensors → processing → rendering" fits into a stable frame with a total duration of about CPU  $\approx 32.5$  ms. The frame clearly shows a phase delay  $\text{WaitForTargetFPS} \approx 13.1$  ms, i.e. part of the time is spent on software synchronization with the target frequency frame cap. The active computing load before waiting is about 19.4 ms per frame (32.5–13.1), which explains the current effective frequency of about 30 FPS (guidelines on the upper scale: 16.6 ms = 60 FPS, 33.3 ms = 30 FPS). The timeline graph shows characteristic marks: single narrow peaks of 7.37 ms and 3.47 ms in the preparation/render stages, as well as short sections of  $< 0.2$  ms; in the "secondary" rendering thread,  $\text{Render Camera} \approx 2.29$  ms and  $\text{Camera.Geometry.Job} \approx 0.17$  ms are reflected.  $\text{Semaphore.WaitForSignal} \approx 10.4$  ms is separately recorded, which indicates waiting for synchronization with the graphics device/scan-out and is consistent with the presence of  $\text{WaitForTargetFPS}$ . In other words, the current frame is formed with a reserve in calculations, but the actual displayed frames are limited by the target refresh rate.

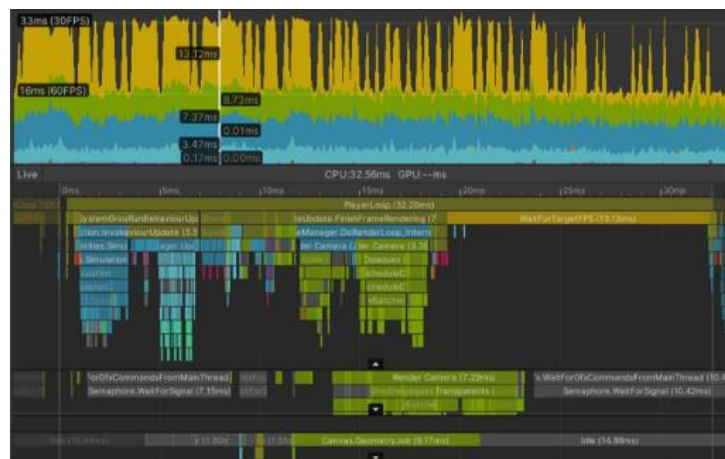


**Figure 11.** Unity Profiler: frame performance timeline of the simulator

In terms of interaction with the external Python tracker and camera, the timeline does not demonstrate long blocking of the main loop: processing of the BNO055 shot and orientation reception events fits into short script segments and does not displace the FinalizeRendering stages and sending commands to the graphics pipeline. This confirms the correctness of the chosen architecture of non-blocking exchange: the coordination of "camera frames → IR tag coordinate 850 nm → socket → engine" does not create noticeable jitter on the main thread and maintains the predictability of the rendering phases.

The obtained indicators are directly translated into reliability requirements. Firstly, the response to the shot is synchronized: the "trigger" event is processed in the priority thread and gets into the current visualization frame, and due to the homograph of the  $2.5 \times 2.5$  m plane, the hit coordinate is restored in the metric system of the scene. Secondly, the ballistic module has time to integrate the trajectory within the frame budget: the contribution of the Render Camera  $\approx 2.29$  ms and the absence of long sections of computational "tetanus" indicate that the RK4/RKF45 calculations and the applied logic of the scenarios remain deterministic in time. Thirdly, stability is achieved at the level of two independent measurement circuits - inertial (BNO055) and optical (IR tag + camera): even with a temporary loss of one of the sources, the system continues to form a shot and register a hit without interrupting the training session. Fourth, full tracing of session parameters ensures reproducibility: IMU firmware version, camera settings, homograph matrix, script and engine versions, network delays and timestamps are recorded in a secure log, allowing experiments to be repeated and results to be compared between attempts.

**Conclusions.** In the course of the work, an intelligent architecture of the shooting simulator was developed and experimentally tested, which is based on the combination of inertial measurement of orientation BNO055 and optical registration of hits using an infrared pointer 850 nm and an IR camera. The constructed circuit "sensors → Python application → game engine → projection scene  $2.5 \times 2.5$  m" demonstrated the ability to provide a synchronous response to a shot, accurate ballistic processing and metrically linked results in real-time.

Profiling of the system showed that the simulator's computational load fits into the frame budget, and the main limiter is the target refresh rate. This confirms a sufficient reserve for calculations and the possibility of scaling due to optimizations (for example, adaptive selection of integrators or unloading of auxiliary tasks). The absence of long locks on the critical path indicates the correctness of the non-blocking exchange between the Python tracker and the game engine. Practical tests have demonstrated that the system remains stable even with temporary failures of individual components: weapon orientation continues to come from the IMU, and the optical channel ensures validation of hits and the capability for subsequent ballistics calibration. Logging of all events (sensor status, calibration parameters, and software versions) allows for reproducing sessions and objectively comparing results between trainees. Future work will focus on integrating biometric monitoring and multi-user training modes to further expand the applicability of the system.

## References

1. See, P. J., & Davies, A. (2024). How far have we advanced in simulation-based training for policing and law enforcement? A literature review. *Policing: A Journal of Policy and Practice*, 18, paae116.  
<https://doi.org/10.1093/police/paae116>
2. Kleygrewe, L., Hutter, R. I. V., Koedijk, M., & Oudejans, R. R. D. (2024). Virtual reality training for police officers: A comparison of training responses in VR and real-life training. *Police Practice and Research*, 25(1), 18–37.



3. Buga, A., Decker, D. D., Robinson, B. T., Crabtree, C. D., Stoner, et al. (2024). The VirTra V-100 is a test-retest reliable shooting simulator for measuring accuracy/precision, decision-making, and reaction time in civilians, police/SWAT, and military personnel. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 38(10), 1714–1723.  
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004875>
4. Warburton, M., Mon-Williams, M., Mushtaq, F., & Morehead, J. R. (2023). Measuring motion-to-photon latency for sensorimotor experiments with virtual reality systems. *Behavior Research Methods*, 55, 3658–3678.  
<https://doi.org/10.3758/s13428-022-01983-5>
5. Vlahovic, S., Suznjovic, M., & Skorin-Kapov, L. (2022). A survey of challenges and methods for Quality of Experience assessment of interactive VR applications. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 16(3), 257–291.  
<https://doi.org/10.1007/s12193-022-00388-0>
6. Stauffert, J.-P., Niebling, F., & Latoschik, M. E. (2020). Latency and cybersickness: Impact, causes, and measures. A review. *Frontiers in Virtual Reality*, 1, 582204.  
<https://doi.org/10.3389/frvir.2020.582204>
7. Huseynov, N., Dadashov, F., & Hesenov, H. (2025). *Hybrid real-time ballistics in Unity: Adaptive integrators, layered wind and thrust* (Version 2). Authorea.  
<https://doi.org/10.22541/au.174738604.44868984/v2>

## İNTELLEKTUAL ODLU SİLAH ATIŞ TRENAJORLARIN ETİBARLILIĞI

Hüseynov N. E., Dadaşov F.H., Həsənov H.B.

**Xülasə.** *İntellektual trenajorlar hərbi təlimdə, tibbdə və təhsildə mühüm rol oynayır. Lakin onların geniş istifadəsi üçün yüksək etibarlığa zəmanət verilməlidir. Əsas problemlər: gecikmə müddəti, vizuallaşdırma və ballistik hesablamaların yüksək dəqiqliyi, aparat və proqram təminatının sabit işləməsi və kursantların məlumatlarının qorunmasıdır. Təklif olunan arxitektura ballistik modulu, biometrik monitorinqi və ekspert sistemini birləşdirir, təlim nəticələrinin təkrarlanmasını təmin edir. Testlər göstərir ki, sistem real vaxt rejimində minimum gecikmələr, yüksək dəqiqlik və nasazlıqlara dözümlüləklə çəkilişləri simulyasiya etmək qabiliyyətinə malikdir ki, bu da onun hüquq-mühafizə orqanlarının mütəxəssislərinin hazırlanması üçün praktiki əhəmiyyətini təsdiqləyir. Profilləşdirmə nəticələri göstərir ki, sensor girişindən vizuallaşdırmaya qədər kritik yol ~30 FPS effektiv performans və mərmirə trayektoriyalarının deterministik integrasiyası ilə ~32,5 ms sabit çərçivəsində qalır. Sistem fasiləsiz təlim seanslarını təmin edərək sensorların müvəqqəti nasazlığı zamanı funksionallığı qoruyur. Bu tədqiqat onu nümayiş etdirir ki, etibarlı, real vaxt rejimində ballistik simulyasiya sərfəli avadanlıqla əldə edilə bilər, bu, bacarıqların ötürülməsi, ssenari eksperimentləri və müdafiə və təhlükəsizlik sahələrində obyektiv performansın qiymətləndirilməsi üçün möhkəm platformaya təklif edir.*

**Açar sözlər:** *intellektual trenajor, etibarlıq, virtual reallıq, sensor emal, təlim sistemləri*



## ÖYRƏNƏN MAŞINLAR VƏ ÖYRƏDƏN SİMULYATORLAR: TƏDRİS STRATEGİYALARINDA YENİ PARADİQMA



**Səfixanov E.R.**

Lənkəran Dövlət Universiteti, Lənkəran, Azərbaycan

[elsen.sefixanov40@gmail.com](mailto:elsen.sefixanov40@gmail.com)

**Xülasə.** Bu məqalədə süni intellekt əsaslı simulyatorların tədris prosesinə integrasiyası və onların öyrənmə nəticələrinə təsiri nəzəri əsaslarla araşdırılmışdır. Araşdırmanın məqsədi süni intellekt texnologiyalarının fərdiləşdirilmiş və adaptiv öyrənmə mühitlərinin yaradılmasında rolu, müəllimlərin texnopedoloji bacarıqlarının artırılması və qiymətləndirmə sistemlərinin təkmilləşdirilməsi istiqamətlərini müəyyən etməkdir. Metodoloji baza kimi müasir pedaqoji nəzəriyyələr, o cümlədən konstruktivizm və konnektivizm yanaşmaları, eləcə də süni intellektin təhsil sahəsində tətbiqi üzrə qabaqcıl elmi tədqiqatlar istifadə edilmişdir.

Tədqiqat göstərir ki, süni intellekt əsaslı təhsil platformaları tələbələrin fərdi xüsusiyyətlərinə uyğunlaşdırılmış məzmun təqdim etməklə öyrənmə motivasiyasını və nəticələrini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Müəllimlərin texnopedoloji bacarıqlarının inkişafı süni intellekt vasitələrinin effektiv istifadəsi üçün vacibdir və bu sahədə xüsusi təlim proqramlarının tətbiqi tövsiyə olunur. Bundan başqa, süni intellekt əsaslı simulyatorlar təhsil prosesində qiymətləndirmənin obyektivliyini və kontekstual xarakterini təmin edir, praktik bacarıqların formalaşmasında önəmli rol oynayır.

Məqalədə etik və hüquqi məsələlərin də xüsusi vurğulanması süni intellektin təhsildə məsuliyyətli istifadəsinin təminatı üçün normativ bazanın formalaşdırılmasının zəruriliyini göstərir. Beynəlxalq əməkdaşlığın və multidissiplinar tədqiqatların genişləndirilməsi isə texnologiyanın milli təhsil sisteminə uğurlu adaptasiyasına töhfə verir.

Nəticədə, süni intellekt əsaslı simulyatorların təhsildə tətbiqi tədrisin fərdiləşdirilməsi, müəllim və tələbələrin texnoloji savadlılığının artırılması, həmçinin qiymətləndirmə sistemlərinin təkmilləşdirilməsi istiqamətində elmi və praktiki inqilab yaratmağa qadirdir. Bu, Azərbaycan təhsil sisteminin müasir dünya standartlarına uyğun inkişafına imkan verəcək strateji istiqamətdir.

**Açar sözlər:** süni intellekt öyrənmə prosesi təhsil texnologiyaları simulyatorlar fərdiləşdirilmiş təhsil qiymətləndirmə sistemləri pedaqoji innovasiyalar

**Giriş.** 21-ci əsrin informasiya və texnologiya erasına keçidi ilə təhsil sahəsi ciddi dəyişikliklərlə üzləşmişdir. Ənənəvi tədris modelləri artıq təkbaşına bu dəyişikliklərə cavab verə bilmir. Qlobal miqyasda sürətlə inkişaf edən süni intellekt (Sİ) texnologiyaları, xüsusilə də simulyasiya əsaslı tədris vasitələri təhsil sistemlərinə yeni nəfəs gətirir. Simulyatorlar tədris prosesində real həyatda qarşılaşla biləcək situasiyaların təhlükəsiz və idarəolunan Süni İntellekt əsasında tətbiqinə imkan yaradır. Bu texnologiyalar öyrənməni yalnız passiv bilik ötürülməsi deyil, fəal və interaktiv prosesə çevirir [1].

Süni intellektin əsasını təşkil edən maşın öyrənməsi alqoritmləri artıq tədris prosesində həm öyrənən, həm də öyrədən rolunu oynayacaq qədər inkişaf etmişdir. Bu sistemlər tələbələrin öyrənmə tərzlərini analiz edir, fərdiləşdirilmiş məzmun təqdim edir və öyrənmə prosesinə uyğunlaşdırılmış geribildirim verir. Belə yanaşma yalnız biliklərin mənimsənilməsi deyil, eyni zamanda metakognitiv bacarıqların inkişafına da şərait yaradır [2].

Təhsildə simulyatorların tətbiqi isə praktiki bacarıqların, qərarvermə və problem həll etmə qabiliyyətlərinin inkişafına xidmət edir. Tibbdən mühəndisliyə, pedaqogikadan iqtisadiyyata qədər

geniş sahələrdə simulyatorlar real təcrübənin risklərini aradan qaldıraraq öyrənməni stimullaşdırır. Bununla yanaşı, bu sistemlər emosional zəka və sosial öyrənmə aspektlərini də əhatə edərək, tələbənin bütöv şəxsiyyət kimi inkişafına yönəlmişdir [3].

Bu məqalənin məqsədi öyrənən maşınlar və öyrədən simulyatorların tədris strategiyalarına gətirdiyi yeni elmi yanaşmaları araşdırmaqdır. Burada süni intellekt sistemlərinin pedaqoji proseslərə necə inteqrasiya olunduğu, onların tədris mühitinə verdiyi töhfələr, tətbiq səmərəliliyi və mövcud metodlarla müqayisəli təhlili aparılacaq. Bu kontekstdə, müəllim və tələbə rollarının yenidən müəyyənlənməsi, qiymətləndirmə sistemlərinin avtomatlaşdırılması və təhsil nəticələrinin keyfiyyətə yüksəldilməsi imkanları dəyərləndiriləcək [4].

Nəhayət, bu araşdırma süni intellekt texnologiyalarının yalnız texniki bir alət olaraq deyil, həm də yeni pedaqoji fəlsəfənin əsas elementi kimi necə formalaşdığını göstərmək niyyətini daşıyır. Beləliklə, öyrənən maşınlar və öyrədən simulyatorlar tədrisdə radikal transformasiyanın əsas vektoru kimi təhlil olunacaq.

Bu tədqiqat nəzəri əsaslı elmi araşdırmadır və əsas məqsədi süni intellekt texnologiyalarının və simulyatorların tədris strategiyalarına təsirini analitik və konseptual çərçivədə təhlil etməkdir. Metodoloji yanaşma kimi konseptual təhlil, elmi-nəzəri sintez və müqayisəli yanaşma əsas götürülmüşdür [5].

Əvvəla, mövcud ədəbiyyatların sistemli təhlili aparılmışdır. Burada Scopus və Web of Science elmi bazalarında yer alan son 10 ildə dərc edilmiş məqalə, kitab və tədqiqat hesabatları araşdırılmışdır. Süni intellekt, simulyator texnologiyaları, fərdiləşdirilmiş tədris, təhsil simulyasiyası və maşın öyrənməsi ilə bağlı terminoloji və nəzəri yanaşmalar müqayisəli şəkildə təhlil olunmuşdur.

Konseptual yanaşma çərçivəsində öyrənmə nəzəriyyələri – xüsusilə konstruktivizm, sosiokultural nəzəriyyə və konnektivizm – süni intellekt və simulyator əsaslı təlim mühitlərinə tətbiq edilmişdir. Bu yanaşma vasitəsilə bu texnologiyaların hansı pedaqoji prinsiplərlə uzlaşdığı və hansı təlim nəticələrinə yönəldiyi aydınlaşdırılmışdır [6].

Nəzəri təhlil çərçivəsində süni intellekt texnologiyalarının təhsil sistemində struktur səviyyəsində (kurikulum, qiymətləndirmə, müəllim hazırlığı) və proses səviyyəsində (tədris metodları, tələbə fəallığı, geribildirim) yaratdığı dəyişikliklər elmi cəhətdən qiymətləndirilmişdir. Bundan əlavə, fərqli ölkələrdə həyata keçirilmiş nümunəvi tətbiqlər müqayisə edilərək modellərarası fərqlər və uyğunluqlar təhlil olunmuşdur [7].

Tədqiqatda nəzəri sintez metodu da istifadə edilmişdir. Bu, müxtəlif mənbələrdən əldə olunan bilikləri bir sistem daxilində birləşdirməyə və süni intellekt əsaslı təlimin potensial imkanlarını ümumiləşdirməyə imkan vermişdir. Elmi mənbələrdəki empirik tapıntılarla nəzəri konsepsiyalar arasında əlaqələr qurularaq elmi əsaslandırılmış nəticələr çıxarılmışdır.

Beləliklə, metodologiya hissəsi praktik deyil, nəzəri-konseptual təhlil modelinə əsaslanaraq mövcud elmi fikirlərin sistemləşdirilməsi və yeni pedaqoji yanaşmanın formalaşdırılması məqsədinə xidmət edir.

**Nəticə və müzakirələr.** Tədqiqatın nəzəri nəticələri göstərir ki, süni intellekt əsaslı öyrənmə mühitləri ənənəvi tədris modellərini tamamlayaraq təhsil sistemində yeni dinamika qazandırır. Birinci əsas nəticə, bu texnologiyaların fərdiləşdirilmiş təlim mühitlərinin yaradılmasında kritik rol oynamasıdır. Süni intellekt sistemləri tələbələrin öyrənmə sürətini, bilik səviyyəsini və maraqlarını analiz edərək onlara uyğun tədris ssenariləri təqdim edir. Bu isə “hər kəs üçün eyni dərs” yanaşmasının məhdudluğunu aradan qaldıraraq tələbəyə əsaslanan təlim modelini gücləndirir [8].

İkinci nəticə, süni intellekt əsaslı simulyatorların tələbələrdə yüksək səviyyəli düşünmə bacarıqlarını stimullaşdırmasıdır. Bu texnologiyalar yalnız fakt biliklərini yox, analitik düşüncə, problem həll etmə və qərarvermə kimi 21-ci əsr bacarıqlarını inkişaf etdirməyə yönəlib. Məsələn, səhiyyə təlimlərində istifadə olunan virtual xəstə modelləri tələbəyə klinik qərar vermə ssenarilərini

real şəraitdə tətbiq etmə imkanı yaradır [9].

Üçüncü əsas müşahidə, simulyatorların emosional və sosial öyrənməyə təsiridir. Süni intellekt sistemləri istifadəçinin emosional vəziyyətini təhlil edə və tədris prosesini adaptiv şəkildə tənzimləyə bilər. Bu xüsusiyyət təlim zamanı stress, motivasiya çatışmazlığı və diqqət itkisi kimi halları azaltmaqla öyrənməyə davamlılığı artırır [10].

Bununla yanaşı, süni intellekt texnologiyalarının tədrisə integrasiyası ilə bağlı bir sıra çağırışlar da mövcuddur. Ən önəmlilərindən biri etik və məxfiliyə dair suallardır. Süni intellekt sistemlərinin topladığı məlumatların istifadəsi, saxlanması və analizinin etik çərçivədə tənzimlənməsi vacib şərtidir. Bundan əlavə, müəllimlərin texnopedoqoji bacarıqlarının inkişaf etdirilməsi zəruridir. Texnologiyanın effektiv tətbiqi yalnız alətə sahib olmaqla deyil, onun pedaqoji dəyərini anlamaqla mümkündür [11].

Nəzəri müzakirələrdən belə nəticə çıxır ki, süni intellekt əsaslı simulyatorlar tədris prosesində həm funksional, həm də transformativ rol oynayır. Onlar yalnız mövcud prosesləri sürətləndirmir, eyni zamanda yeni öyrənmə modellərinin yaranmasına zəmin yaradır. Bu işə təhsil sahəsində köklü dəyişikliklərə və yeni paradigmalara formalaşmasına səbəb olur.

Əldə olunan nəticələr həm də onu göstərir ki, süni intellekt əsaslı simulyatorlar öyrənmə təcrübəsini yalnız effektiv deyil, həm də mənalı edir. İstifadəçilər öyrəndikləri bilikləri real və praktik ssenarilərdə tətbiq etdikcə, onlar arasında möhkəm mənə əlaqəsi qururlar. Bu işə konstruktivist pedaqogikanın əsas hədəfi olan “şəxsi təcrübəyə əsaslanan öyrənmə” prinsipinə tam uyğundur [12].

Nəticə etibarilə, bu texnologiyaların pedaqoji, sosial və texniki baxımdan integrasiyası üçün çoxşaxəli yanaşmaya ehtiyac vardır. Bu yanaşma həm texniki infrastrukturunu, həm pedaqoji dizaynı, həm də etik standartları əhatə etməlidir.

**Təkliflər.** Bu tədqiqatın nəticələri əsasında Azərbaycan təhsil sistemində süni intellekt əsaslı tədris və simulyasiya texnologiyalarının tətbiqinə dair fundamental dəyişikliklər və elmi inqilab gətirəcək kompleks yanaşmalar təklif edirəm. Bu yanaşmalar təkcə texnoloji yeniliklər deyil, həm də pedaqoji, etik və idarəetmə səviyyəsində çoxşaxəli islahatları ehtiva edir.

Əvvəlcə, Azərbaycan təhsil sistemində fərdiləşdirilmiş öyrənmə mühitlərinin yaradılması üçün milli səviyyədə süni intellekt əsaslı adaptiv tədris platformalarının inkişafı və tətbiqi zəruridir. Bu platformalar tələbələrin fərdi bilik səviyyəsi, öyrənmə tempi və maraqlarına uyğun məzmun təqdim etməklə təhsilə süni intellektliyyətlərini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Qlobal təcrübələrdə uğur qazanan DreamBox, Knewton və Squirrel süni intellekt kimi sistemlər fərdiləşdirilmiş təhsilin effektivliyini sübut etmişdir [13]. Azərbaycan üçün milli kontekstə uyğunlaşdırılmış platformaların hazırlanması mədəni və dil aspektlərini nəzərə alaraq öyrənmə prosesini daha mənalı və davamlı edəcəkdir. Dövlət səviyyəsində belə layihələrin maliyyələşdirilməsi və təhsil müəssisələri ilə əməkdaşlıq bu istiqamətdə əsas prioritet olmalıdır.

İkinci olaraq, müəllimlərin texnopedoqoji bacarıqlarının inkişafı çox önəmlidir. Müasir müəllim yalnız fənn üzrə mütəxəssis olmaqla kifayətlənməməli, süni intellekt və simulyator texnologiyalarının pedaqoji imkanlarını dərinlən mənimsəməlidir. Pedaqoji universitetlərdə süni intellekt və təhsil analitikası üzrə ixtisaslaşmış kursların açılması və davamlı professional inkişaf proqramlarının təşkili bu məqsədə xidmət edəcəkdir [14]. Müqayisəli tədqiqatlar göstərir ki, texnopedoqoji kompetensiyaları yüksək olan müəllimlər bu texnologiyalardan daha səmərəli istifadə edirlər [9]. Bu, təhsilin keyfiyyətinə birbaşa müsbət təsir göstərir.

Üçüncü vacib sahə qiymətləndirmə sistemlərinin yenilənməsidir. Süni intellekt əsaslı simulyatorların tədris prosesinə integrasiyası tələbələrin biliyini real situasiyalarda və interaktiv mühitdə ölçmək imkanı verir. Bu qiymətləndirmə metodları ənənəvi yazılı testlərə nisbətən daha obyektiv və hərtərəfli əks əlaqə təmin edir. Belə yanaşma xüsusilə tibb, mühəndislik və pedaqoji təhsil sahələrində praktik bacarıqların inkişafı üçün əvəzsizdir. Azərbaycan təhsil müəssisələri bu

imkanlardan maksimum istifadə etməli, qiymətləndirmə sistemlərinin rəqəmsallaşdırılması və simulyator texnologiyalarının tətbiqini prioritet etməlidir.

Dördüncüsü, süni intellekt texnologiyalarının etik və hüquqi aspektləri xüsusi diqqət tələb edir. Tələbə məlumatlarının məxfiliyyətinin qorunması, məlumatların şəffaf və məsuliyyətli idarəsi üçün beynəlxalq təcrübələrə əsaslanan normativ-hüquqi bazanın yaradılması zəruridir [5]. Süni intellekt qərar qəbul etmə proseslərində izah ediləbilənlik prinsipi əsasında etik standartlar tətbiq olunmalı, tələbə və müəllim hüquqları qorunmalıdır. Hüquqşünaslar, pedaqoqlar və texnoloji mütəxəssislərin birgə çalışması multidissiplinar hüquqi mexanizmlərin yaradılmasını təmin edəcəkdir.

Beşinci təklifim beynəlxalq elmi əməkdaşlığın genişləndirilməsi və multidissiplinar tədqiqatların təşviqidir. Azərbaycan universitetləri süni intellekt və təhsil simulyatorları sahəsində aparıcı dünya universitetləri ilə əlaqələr qurmalı, gənc tədqiqatçıların beynəlxalq konfranslarda iştirakını və birgə layihələri dəstəkləməlidir [6]. Bu, təhsil texnologiyalarının ölkəmizə adaptasiyasını sürətləndirəcək və yerli innovasiyaların inkişafına təkan verəcəkdir.

Son olaraq, süni intellektin təhsildə tətbiqi təhsil fəlsəfəsinin yenidən qurulmasını tələb edir. Müəllimin rolu bilik ötürücüdən tədris prosesinin fasilitatoruna çevrilir. Konstruktivizm və konnektivizm nəzəriyyələrinin prinsipləri yeni texnoloji şəraitdə aktuallaşır [14]. Tədris metodları daha interaktiv, tələbə mərkəzli və kontekstual olmalı, öyrənənlərin fəallığı artırılmalıdır. Pedaqoji kadrların təlimində yeni yanaşmalar tətbiq edilməli, təhsil idarəetməsi səviyyəsində müvafiq strategiyalar hazırlanmalıdır.

Ümumilikdə, təqdim etdiyim bu təkliflər Azərbaycan təhsil sistemində süni intellekt texnologiyalarının elmi inqilabi tətbiqinə əsas yaradacaq, təhsilin keyfiyyətini, şəffaflığını və əlçatanlığını artıracaqdır. Bu istiqamətdə atılacaq addımlar ölkəmizin təhsil sahəsində global trendlərə uyğunlaşmasını təmin etməklə yanaşı, müəllim və tələbələrin texnoloji savadlılığının yüksəlməsinə də şərait yaradacaq.

### Ədəbiyyat

1. Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 1–27.  
<https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>
2. Roll, I., & Wylie, R. (2016). Evolution and Revolution in Artificial Intelligence in Education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 26(2), 582–599.  
<https://doi.org/10.1007/s40593-016-0110-3>
3. Woolf, B. P., Burleson, W., Arroyo, I., Dragon, T., Cooper, D. G., & Picard, R. W. (2009). Affect-aware tutors: Recognizing and responding to student affect. *International Journal of Learning Technology*, 4(3-4), 129–164.  
<https://doi.org/10.1504/IJLT.2009.026256>
4. Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). *Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning*. Center for Curriculum Redesign
5. Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2018). *Research Methods in Education* (8th ed.). Routledge.
6. Siemens, G. (2005). Connectivism: A Learning Theory for the Digital Age. *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*, 2(1), 3–10.
7. Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L. B. (2016). *Intelligence unleashed: An argument for AI in education*. Pearson Education.
8. Ifenthaler, D., & Yau, J. Y.-K. (2020). Utilising Learning Analytics for Study Success: Reflections on Current Empirical Findings. *Computers in Human Behavior*, 107, 105512.



- <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.105512>
9. Woolf, B. P., Burleson, W., Arroyo, I., Dragon, T., Cooper, D. G., & Picard, R. W. (2009). Affect-aware tutors: Recognizing and responding to student affect. *International Journal of Learning Technology*, 4(3-4), 129–164.  
<https://doi.org/10.1504/IJLT.2009.026256>
  10. Bransford, J. D., Brown, A. L., & Cocking, R. R. (2000). *How People Learn: BrSüni İntellekt, Mind, Experience, and School*. National Academy Press.
  11. Ertmer, P. A., & Ottenbreit-Leftwich, A. T. (2010). Teacher technology change: How knowledge, confidence, beliefs, and culture intersect. *Journal of Research on Technology in Education*, 42(3), 255–284.  
<https://doi.org/10.1080/15391523.2010.10782551>
  12. Koehler, M. J., & Mishra, P. (2009). What is technological pedagogical content knowledge (TPACK)? *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, 9(1), 60–70.
  13. Ifenthaler, D., & Yau, J. Y.-K. (2020). Utilising Learning Analytics for Study Success: Reflections on Current Empirical Findings. *Computers in Human Behavior*, 107, 105512.  
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.105512>
  14. Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., ... & Vayena, E. (2018). AI People—An ethical framework for a good AI society: Opportunities, risks, principles, and recommendations. *Minds and Machines*, 28(4), 689–707.  
<https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>

## LEARNING MACHINES AND LEARNING SIMULATORS: A NEW PARADIGM IN TEACHING STRATEGIES

Safikhanov E.R.

**Abstract.** This article theoretically investigates the integration of artificial intelligence (AI)-based simulators into the teaching process and their impact on learning outcomes. The purpose of the study is to identify the role of AI technologies in creating personalized and adaptive learning environments, enhancing teachers' technopedagogical skills, and improving assessment systems. The methodological framework is based on modern pedagogical theories, including constructivism and connectivism, as well as advanced scientific research on the application of AI in education.

The study shows that AI-based educational platforms significantly increase learning motivation and outcomes by delivering content tSüni İntellektlored to students' individual characteristics. The development of teachers' technopedagogical skills is essential for the effective use of AI tools, and specialized AI İntellektning programs in this area are recommended. Furthermore, AI-based simulators ensure objectivity and contextual relevance in educational assessment, playing a crucial role in developing practical skills.

The article also emphasizes ethical and legal issues, highlighting the necessity of establishing a normative framework to ensure the responsible use of AI in education. Expanding international collaboration and multidisciplinary research contributes to the successful adaptation of technology within the national education system.

As a result, the application of AI-based simulators in education is capable of creating a scientific and practical revolution in personalizing teaching, enhancing the technological literacy of teachers and students, and improving assessment systems. This represents a strategic direction that will enable the development of the AzerbSüni İntellektjani education system in line with modern global standards.

**Keywords:** artificial intelligence, learning process, educational technologies, simulators, personalized education, assessment systems, pedagogical innovations



## SÜNİ İNTELLEKT SİMULYATORLARI VƏ ÖYRƏNMƏ PROSESİNİN BÜNÖVRƏSİ MƏKTƏBƏQƏDƏR YAŞ DÖVRÜNDƏN NECƏ QOYULMALIDIR



**Rəhimova Q.M.**

Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti, Bakı, Azərbaycan  
qm.rahimova@adpu.edu.az

**Xülasə.** Məqalənin əsas tədqiqat obyekti süni intellekt simulyatorları və öyrənmə prosesinin bünövrəsi məktəbəqədər yaş dövründən necə qoyulması prosesidir. Məqaləni yazmaqda məqsədımız məktəbəqədər yaş dövründə hansı üsullarla bu prosesi həyata keçirməkdən ibarətdir. Süni intellekt simulyatorları məktəbəqədər təhsildə öyrənmə prosesinin əsaslarını daha dinamik, fərdi və effektiv şəkildə formalaşdırmağa imkan verir. Bununla belə, texnologiyanın etik, psixoloji və sosial aspektləri nəzərə alınmadan tətbiqi mənfi nəticələrə səbəb ola bilər. Ona görə də, texnoloji imkanlarla yanaşı, pedaqoji nəzarət, etik yanaşma və balanslaşdırılmış mühit vacibdir. Belə ki, bu işdə böyüklərin xüsusilə məktəbəqədər müəssisələrdə tərbiyəçinin, ailədə isə valideynlərin məktəbəqədər yaşlı uşaqlara nəzarəti böyükdür.

**Açar sözlər:** məktəbəqədər yaş dövrü, süni intellekt simulyatorları, təlim, tərbiyə, psixoloji, sosial aspektləri.

**Giriş.** Məktəbəqədər yaş dövrü uşaqların idrak, sosial, emosional və nitq inkişafının əsas mərhələsi hesab olunur. Bu mərhələdə düzgün pedaqoji yanaşma uşağın gələcək təhsil uğurlarına birbaşa təsir göstərir. Müasir dövrdə süni intellekt (Sİ) texnologiyaları təhsilin bütün pillələrinə, o cümlədən məktəbəqədər sahəyə sürətlə inteqrasiya olunur. Xüsusilə simulyatorlar vasitəsilə öyrənmənin təşkili uşaqlarda tədqiqat bacarıqlarını inkişaf etdirir, fərdi öyrənmə imkanlarını genişləndirir və yaradıcı düşüncəni dəstəkləyir. Bununla belə, Sİ texnologiyalarının erkən yaşlarda tətbiqi zamanı psixoloji, sosial və etik məsələlər də nəzərə alınmalıdır.

XXI əsrin ən böyük texnoloji nailiyyətlərindən biri süni intellektin (Sİ) təhsildə tətbiqidir. Sİ texnologiyaları, xüsusilə simulyatorlar, artıq ali və orta təhsildə istifadə olunmağa başlasa da, onların məktəbəqədər təhsildə rolu yeni tədqiqat və inkişaf mərhələsindədir. Məktəbəqədər dövr insan həyatının əsas öyrənmə mərhələsi olduğuna görə bu yaş dövründə qoyulan bünövrə gələcək bilik və bacarıqların formalaşmasında həlledici rol oynayır. Bu baxımdan, Sİ texnologiyalarının erkən yaşdan düzgün inteqrasiyası uşaqların tənqidi düşünmə, problem həll etmə və adaptiv öyrənmə bacarıqlarını inkişaf etdirə bilər.

Uşağın intellektual inkişafı onda psixi proseslərin, xüsusən də duyğuların inkişafından, qavrayışın təkmilləşməsindən, yəni ətrafdakı əşya və hadisələrin hisslərlə əks etdirməsindən başlanır. Ətraf aləmin duyğular vasitəsilə dərk edilməsi insanın intellektual cəhətdən təkmilləşməsinə səbəb olur. Uşaqlar təlim məşğələləri vasitəsilə ətraf mühiti dərk edir, onlar tədricən mühitə və burada əmələ gələn dəyişikliklərə uyğunlaşırlar.

Uşağın intellektual fəaliyyəti onun təxəyyülünə, təsəvvürünə, mühakiməsinə özünəməxsus rəngarənglik verən emosiya ilə sıx bağlıdır. Bütün yeniliklər uşaqlarda təəccüb əmələ gətirməklə bəzən heyrət, sevinc, bəzən vahimə, qorxu yaradır. Bu emosiyalar hafizədə saxlanılaraq, elə bil həmin əşyanın və ya hadisənin keyfiyyəti kimi əks olunur. Uşaqların intellektual inkişafı öz tutumu, xarakteri və biliyinin məzmununa görə fərqlənir. Daim axtarılda olan, bilmədiyini öyrənməyə həvəs göstərən uşaqlar daha fəallıq daha üstün olur.

Uşağın məktəbə hazırlanmasında onun intellektual hazırlığı çox mühüm məqsədlərdən biridir. Bu hazırlıq müxtəlif məktəbəqədər yaş dövrlərindən yaşa müvafiq sadədən mürəkkəbə tələbi nəzərə alınmaqla aparılır. Belə ki, bu hazırlıq yalnız uşaqlara bilik və bacarıqlar vermək istiqamətində

deyil, onların intellektual qabiliyyətləri və idrak marağının ümumi inkişafı (müşahidə etmək, təhlil etmək, müqayisə etmək, ümumiləşdirmək, bunların əsasında nəticə çıxarmaq, əqli nəticəyə gəlmək) istiqamətində aparılmalıdır. (Məmmədova, 2007)

Məktəbəqədər yaşlı uşaqların intellektual inkişafını təmin etmək məqsədilə aşağıdakı vəzifələr müəyyən edilmişdir.

1. Cəmiyyət və təbiət haqqında elmi anlayışları formalaşdırmaqla real elmi dünyagörüşü yaratmaq;

2. İntellektual fəaliyyəti inkişaf etdirməklə öyrənmə marağını və qabiliyyətini, əqli fəaliyyətin digər rəngarəng növlərini formalaşdırmaq;

3. Müstəqil öyrənmə meylini artırmaqla mədəni əqli iş tərbiyə etmək [1].

Məktəbəqədər yaş dövrü (3-6 yaş) uşaqların beyin inkişafı və əsas psixoloji xüsusiyyətlərinin formalaşması baxımından ən kritik dövrdür. Bu dövrdə uşaqlarda sensor-motor və kognitiv bacarıqlar sürətlə inkişaf edir, dil, emosional ifadə və sosial qarşılıqlı əlaqə formalaşır, uşaqlar məktəbəqədər dövrdə artıq diqqətini yönəltməyi və sadə məntiqi düşünməyi öyrənirlər. Bu bacarıqlar daha sonrakı təhsildə – oxumaq, yazmaq, riyaziyyat kimi fənlərin öyrənilməsində əsas rol oynayır. Belə ki, bütün bunlar məktəbəqədər yaşlı uşaqların əqli tərbiyəsini inkişaf etdirir.

Əqli tərbiyə uşağın zehni inkişafına, təfəkkürünün, məntiqi düşünmə qabiliyyətinin, problem həll etmə bacarığının formalaşmasına yönəlmiş məqsədyönlü və sistemli pedaqoji fəaliyyətdir. Bu tərbiyə forması uşaqlarda idrak proseslərini – qavrayış, diqqət, hafizə, təxəyyül və təfəkkürü inkişaf etdirərək onların ətraf aləmi dərk etmələrinə, hadisələr və obyektlər arasında əlaqələri qurmalarına, səbəb-nəticə münasibətlərini anlamaqlarına kömək edir. Məktəbəqədər yaşlı uşaqlar üçün əqli tərbiyənin məqsədi yalnız biliyin verilməsi deyil, həm də düşünmə vərdişlərinin, yaradıcı yanaşmanın, mühakimə qabiliyyətinin formalaşdırılmasıdır.

Mövzunun aktuallığı ondan ibarətdir ki, müasir təhsil sistemində təkcə bilik ötürülməsi kifayət etmir. Uşaqların düşünmə, təhlil etmə və yaradıcı qərar qəbul etmə bacarıqlarına malik olması əsas hədəf kimi qarşıya qoyulur. Bu bacarıqların təməli isə məhz məktəbəqədər dövrdə, oyunlar, müşahidələr, tapşırıqlar və praktik fəaliyyətlər vasitəsilə qoyulur. Eyni zamanda, müasir psixologiya və pedaqogika elmləri sübut edir ki, erkən yaşlarda uşaqların təfəkkür və əqli inkişaf potensialı daha yüksək olur. Bu potensialın düzgün yönləndirilməsi üçün əqli tərbiyənin məqsədyönlü təşkili zəruridir. [2]

Bu inkişaf sahələri Sİ simulyatorlarının verdiyi imkanlarla daha da stimullaşdırıla bilər.

“Süni intellekt simulyatorları” – real və ya təxmini şəraitin yaradılması ilə öyrənməyə şərait yaradan, Sİ texnologiyasına əsaslanan interaktiv vasitələrdir. Bu texnologiyalar fərdi öyrənmə yolu təqdim edir, uşağın reaksiyalarına uyğunlaşa bilir, real həyat bacarıqlarını təhlükəsiz şəraitdə öyrənməyə imkan yaradır.

**Metodologiya.** Tədqiqat məktəbəqədər təhsildə Sİ simulyatorlarının tətbiq imkanlarını öyrənmək məqsədilə aparılmışdır. Bu məqsədlə:

1. Ədəbiyyat nəzəri təhlil üsulu istifadə olunmuş, beynəlxalq təcrübə araşdırılmışdır (məsələn, Cognimates, Miko AI Robot, ABCmouse və Osmo platformaları).

2. Pedaqoji modellərlə integrasiya prinsipləri müəyyənləşdirilmişdir (oyun əsaslı öyrənmə, konstruktivizm və s.).

3. Ekspert yanaşması ilə mövcud risklər və faydalar sistemləşdirilmişdir.

4. Məktəbəqədər yaş qrupu üçün tətbiq edilən Sİ texnologiyalarına dair tövsiyələr pedaqoji-psixoloji baxımdan dəyərləndirilmişdir.

Məktəbəqədər təhsildə istifadə sahələrini aşağıdakı kimi qruplaşdırmaq olar:

1. Dil inkişafına Sİ ilə çalışan danışq robotları, interaktiv hekayə proqramları aiddir.

2. Riyazi və məntiqi bacarıqlara rəqəmlərlə oynamaq, sadə kodlaşdırma simulyatorları aiddir.

3. Sosial-emosiya öyrənməsinə empatiya və sosial vəziyyət simulyasiyası aiddir.

4. Yaradıcılığa rəsm, musiqi və hekayə qurma alətləri ilə təcrübələr aiddir.

Erkən yaş dövründə məktəbəqədər yaşlı uşaqların təlimi oyun xarakteri daşdığından onlar əvvəl tək, sonra isə yoladaşları ilə oyuncaqlarla oynayırlar. Bu zaman onlarda ünsiyyət formalaşır, onlar əqli mühakimə yürüdə bilirlər. Tədrisən 3-4 yaşından başlayaraq uşaqların öyrənməsi sistemli xarakter daşıyır, onlar verilən suala cavabı daha doğun, rəhbərli nitqi ilə cavab verirlər [3].

**Nəticə.** Tədqiqat nəticəsində müəyyən olunmuşdur ki:

1. Faydalı tərəflər:

1.1. Sİ simulyatorları fərdiləşdirilmiş öyrənməni təmin edir, uşağın öyrənmə sürəti və üslubuna uyğunlaşır.

1.2. Aktiv iştirak və motivasiyanı artırır, öyrənməni daha əyləncəli və interaktiv edir.

1.3. Risk olmadan təcrübə imkanı yaradır, uşaqlar səhv etməklə öyrənirlər.

1.4. Valideyn və müəllimlərə analitik məlumat təqdim edir.

2. Potensial risklər:

2.1. Rəqəmsal asılılıq və sosial bacarıqların zəifləməsi.

2.2. Etik və məxfilik məsələləri.

2.3. Texnologiyadan həddindən artıq istifadə nəticəsində psixoloji və fiziki sağlamlıq problemləri (məsələn, ekran vaxtının çoxluğu).

Süni intellekt simulyatorlarının faydaları böyükdür.

1. Fərdiləşdirilmiş öyrənmə təcrübəsi: Hər uşağın öyrənmə sürətinə və stilinə uyğun adaptasiya olunur.

2. Aktiv iştirak və motivasiya: Simulyatorlar öyrənməni oyunlaşdıraraq daha maraqlı edir.

3. Risk olmadan təcrübə imkanı: Uşaq səhv etməklə öyrənir və nəticələri təhlükəsiz mühitdə sınayır.

4. Valideyn və müəllimlərə analitik məlumat: Sİ sistemləri uşağın inkişafını analiz edərək əks əlaqə verir.

Süni intellektin erkən yaşda mənfi təsiri də vardır. Süni intellektin erkən yaşda istifadəsi bəzi potensial risklərlə də müşayiət olunur:

1. Rəqəmsal asılılıq riski;

2. Sosial bacarıqların az inkişafı;

3. Əxlaqi və etik suallar: Məlumatların qorunması, uşağın özəl həyatına hörmət;

4. Texnologiyaya bərabər çıxış: Sosial ədalət məsələsi.

Bu səbəbdən, Sİ simulyatorları “məhdudiyyətlər və pedaqoji nəzarət çərçivəsində” tətbiq olunmalıdır.

Öyrənmə bünövrəsinin süni intellektlə düzgün formalaşdırılması yollarını aşağıdakı kimi qruplaşdırma bilərik.

1. Pedaqoji modellərlə inteqrasiya: Sİ texnologiyaları müasir pedaqoji yanaşmalarla uyğunlaşdırılmalıdır (oyun əsaslı öyrənmə, konstruktivizm və s.).

2. Müəllim və valideyn hazırlığı: Sİ alətlərindən istifadə üzrə təlimlər keçirilməlidir.

3. Məhdud ekran vaxtı prinsipi: AAP (Amerika Pediatriya Akademiyası) 3-5 yaş uşaqlar üçün gündə maksimum 1 saat ekran vaxtı tövsiyə edir.

4. Əyləncə və öyrənmənin balansı: Simulyatorlar oyun vasitəsilə öyrətsə də, real təcrübə ilə tamamlanmalıdır (məsələn, əşyalarla manipulyasiya, təbiət müşahidəsi).

5. Multimodal yanaşma: Vizual, eşitmə, toxunma kimi müxtəlif sensor sistemlər cəlb olunmalıdır.

Bu məqsədlə nümunə layihələrdən və beynəlxalq təcrübədən istifadə oluna bilər [4].

- Cognimates (MIT Media Lab): Uşaqlar üçün kodlaşdırma və robot təlim proqramıdır.

- Miko AI Robot: Məktəbəqədər yaşda uşaqlarla interaktiv ünsiyyət qura bilən sosial robot.

- ABCmouse və Osmo: Uşaqlar üçün təhsil simulyatorları ilə oyunları birləşdirən platformalar.

Bu layihələr göstərir ki, texnologiya düzgün yanaşma ilə tətbiq olunarsa, öyrənməni zənginləşdirə bilər.

Süni intellekt simulyatorları məktəbəqədər təhsildə öyrənmə prosesinin əsaslarını daha dinamik, fərdi və effektiv şəkildə formalaşdırmağa imkan verir. Bununla belə, texnologiyanın etik, psixoloji və sosial aspektləri nəzərə alınmadan tətbiqi mənfi nəticələrə səbəb ola bilər. Ona görə də, texnoloji imkanlarla yanaşı, pedaqoji nəzarət, etik yanaşma və balanslaşdırılmış mühit vacibdir. Belə ki, bu işdə böyükklərin xüsusilə məktəbəqədər müəssisələrdə tərbiyəçinin, ailədə isə valideynlərin məktəbəqədər yaşlı uşaqlara nəzarəti böyükdür.

**Müzakirə.** Araşdırma göstərir ki, süni intellekt texnologiyaları məktəbəqədər yaşda öyrənmənin fərdiləşdirilməsi və motivasiyanın artırılması baxımından mühüm potensiala malikdir. Lakin texnologiyanın təkbaşına istifadəsi uşağın tam inkişafını təmin etmir. Ona görə də balanslı yanaşma vacibdir: Sİ simulyatorları oyun, praktiki fəaliyyət, sosial qarşılıqlı əlaqə və yaradıcı məşğələlərlə birgə tətbiq olunmalıdır.

Pedaqoji baxımdan Sİ simulyatorları konstruktivist yanaşma ilə uyğun gəlir, çünki uşaqlar öyrənmə prosesində aktiv iştirak edir, təcrübə qazanır və real həyat bacarıqlarına hazırlanırlar. Bununla yanaşı, valideyn və müəllimlərin nəzarəti, ekran vaxtının məhdudlaşdırılması və etik prinsiplərin qorunması zəruridir.

Beləliklə, nəticəyə gəlmək olar ki, süni intellekt simulyatorları məktəbəqədər təhsildə düzgün metodlarla tətbiq edilərsə, öyrənmə prosesinin bünövrəsini daha möhkəm və səmərəli şəkildə formalaşdırmaq mümkündür.

### Ədəbiyyat

1. Azərbaycan Respublikası. (2007, 12 aprel). "Azərbaycan Respublikasında məktəbəqədər təhsilin yeniləşdirilməsi proqramı". Bakı.
2. Kərimov, Y. Ş. (2002). "Uşaq məktəbə gedir". Bakı.
3. Məmmədova, A. M. (2007). Uşaq bağçasında beşyaşlıların məktəbə hazırlanması. Bakı: ADPU.
4. Nsportal. (2020, 9 sentyabr). "Rol khudozhestvennoy literatury vo vsestoronnem vospitanii detey". <https://nsportal.ru/detskiy-sad/razmoe/2020/09/09/rol-khudozhestvennoy-literatury-vo-vsestoronnem-vospitanii-detey>

## ARTIFICIAL INTELLIGENCE SIMULATORS AND HOW TO LAY THE FOUNDATION OF THE LEARNING PROCESS FROM PRESCHOOL AGE

Rahimova G.M.

**Abstract.** *The main research object of the thesis is the process of how to lay the foundation of the learning process from preschool age. Our goal in writing the thesis is to find out by what methods this process can be carried out in preschool age. Artificial intelligence simulators allow us to form the foundations of the learning process in preschool education in a more dynamic, individual and effective way. However, the application of technology without taking into account ethical, psychological and social aspects can lead to negative consequences. Therefore, along with technological capabilities, pedagogical control, an ethical approach and a balanced environment are important. Thus, in this case, adults, especially educators in preschool institutions, and parents in the family, have great control over preschool children.*

**Keywords:** *school age, artificial intelligence simulators, training, upbringing, psychological, social aspects.*

## MÜASİR MÜHARİBƏLƏRDƏ ATƏSLƏ ZƏRƏRVURMA TAKTİKALARININ SÜNİ İNTELLEKT SİMULYATORLARI VASİTƏSİLƏ MODELLEŞDİRİLMƏSİ



**Hüseynov Y.Q.**

Naxçıvan Hərbi Kolleci, Naxçıvan, Azərbaycan  
yhuseynov131@gmail.com

**Xülasə.** Müasir döyüş əməliyyatlarının xarakteri sürətlə dəyişməkdədir. İnformasiyanın yüksək sürətlə emalı, döyüş meydanında real vaxtlı qərar qəbuletmə tələbləri və texnoloji üstünlük uğrunda yarış hərbi strategiyaların əsasını təşkil edir. Bu baxımdan, atəslə zərərvurma taktikalarının daha səmərəli və təhlükəsiz şəkildə planlaşdırılması, təhlili və tətbiqi üçün yeni texnologiyaların cəlb olunması zərurətə çevrilmişdir. Süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının və onun əsas tətbiq sahələrindən biri olan simulyasiya modellərinin bu prosesə integrasiyası müasir hərbi elmin mühüm tədqiqat istiqamətlərindən birinə çevrilmişdir.

Bu məqalənin əsas məqsədi müasir müharibələrdə atəslə zərərvurma taktikalarının süni intellekt simulyatorları vasitəsilə necə modelləşdirildiyini, bu texnologiyaların döyüş taktikasına verdiyi töhfələri və onların tətbiqi imkanlarını elmi əsaslarla təhlil etməkdir. Simulyatorlar real döyüş ssenarilərini təqlid etməklə, hərbi heyətin yüksək risk olmadan müxtəlif situasiyalarda qərar vermə qabiliyyətini artırmaq, atəş dəqiqliyini və hədəf seçimini optimallaşdırmaq üçün geniş imkanlar yaradır.

Süni intellekt modelləri sensorlardan və ya kəşfiyyat məlumatlarından daxil olan informasiyanı emal edərək, ərazidəki təhlükə səviyyələrini müəyyənləşdirir, düşmənin mümkün manevrlərini təhlil edir və ssenariyə uyğun optimal atəş həlləri təklif edir. Bu, həm statik, həm də dinamik döyüş şəraitində sürətli və effektiv qərarların qəbuluna şərait yaradır. Alınan nəticələrə əsaslanaraq, atəş resurslarının düzgün bölüşdürülməsi, hədəf prioritetləşdirməsi və döyüş mövqelərinin dəyişməsi kimi proseslər də avtomatlaşdırılmış şəkildə həyata keçirilə bilər.

Məqalədə həmçinin beynəlxalq təcrübələrə – o cümlədən ABŞ, Rusiya və İsrailin tətbiq etdiyi süni intellekt əsaslı atəş simulyatorları təhlil olunur. NATO ölkələri tərəfindən istifadə olunan süni intellekt əsaslı sistemlər döyüş idarəetməsində insan faktorunun rolunu minimuma endirərək daha çevik və dəqiq əməliyyatlar həyata keçirməyə şərait yaradır. Azərbaycanda da bu tip texnologiyaların tətbiqi Vətən müharibəsindən sonra aktualıq qazanmış, Müdafiə Sənayesi Nazirliyi və aidiyyəti qurumların rəqəmsal transformasiya layihələri ilə daha geniş miqyasda nəzərdən keçirilməyə başlanmışdır.

**Açar sözlər:** müasir müharibələr, süni intellekt, atəslə zərərvurma, simulyatorlar, döyüş taktikası, modelləşdirmə

**Giriş.** XXI əsrin əvvəllərindən etibarən dünya üzrə silahlı münaqişələrin xarakteri köklü şəkildə dəyişmişdir. Ənənəvi döyüş modellərindən fərqli olaraq, müasir müharibələr daha çevik, texnologiyaya əsaslanan və yüksək dəqiqlikli sistemlərin tətbiqi ilə həyata keçirilir. Bu dəyişikliklər nəticəsində döyüş meydanlarında yalnız fiziki güc deyil, həm də veri əsaslı qərar qəbuletmə, süni intellekt sistemləri və avtomatlaşdırılmış döyüş vasitələri ön plana çıxmağa başlamışdır [1]. Bu transformasiya fonunda xüsusilə diqqət çəkən aspektlərdən biri də atəslə zərərvurma taktikalarının təkmilləşdirilməsi və idarəetməsidir. Əvvəllər yalnız təlim və təcrübəyə əsaslanan bu taktikalar, indi süni intellektlə dəstəklənən simulyatorlar vasitəsilə sınaqdan keçirilir, modelləşdirilir və optimallaşdırılır. Hədəf seçimi, atəş dəqiqliyi, atəş nöqtələrinin yerləşdirilməsi və zərərvurma



effektivliyinin artırılması kimi vacib faktorlar artıq süni intellekt alqoritmləri vasitəsilə analiz edilə bilər [2].

Daha geniş mənada, bu tendensiya hərbi strategiyanın “rəqəmsallaşması” prosesi çərçivəsində dəyərləndirilə bilər. ABŞ, Rusiya, Çin və İsrail kimi dövlətlər artıq döyüş əməliyyatlarında süni intellekt-pilotlu sistemlər, simulyasiya əsaslı qərar qəbuletmə alqoritmləri və sensor inteqrasiyalı atəş sistemləri tətbiq etməyə başlamışdır [3]. Bu yanaşma orduların klassik strukturlarından uzaqlaşaraq analitik və qabaqlayıcı döyüş modellərinə keçidini təmin edir. Belə modellər isə riskləri azaldır, insan amilindən asılılığı minimuma endirir və səhv ehtimallarını əhəmiyyətli dərəcədə aşağı salır.

Ənənəvi hərbi təlimlərin və taktiki planlamanın ciddi vaxt, resurs və təhlükəsizlik tələb etdiyini nəzərə alsaq, süni intellekt əsaslı simulyatorların döyüş hazırlığında nə qədər əvəzlənməz alətə çevrildiyi aydın görünür. Belə simulyatorlar real döyüş şəraitini modelləşdirərək istər fərdi əsgər, istərsə də komanda qərar qəbuletmə səviyyəsində yüksək səviyyəli hazırlıq təmin edir. Eyni zamanda, bu texnologiyalar təkrarlana bilən təlim ssenariləri, kritik situasiya modelləri və məlumat əsaslı nəticələrin çıxarılması üçün yeni imkanlar yaradır [4].

Azərbaycan kontekstində də bu texnologiyaların tətbiqi getdikcə aktuallaşır. 2020-ci il Vətən Müharibəsi sübut etdi ki, müasir döyüş mühitində texnologiyaya malik olmaq təkcə üstünlük deyil, həm də zərurətdir. Bu baxımdan, atəşlə zərərvurma taktikalarının süni intellekt simulyatorları vasitəsilə modelləşdirilməsi, hərbi effektivliyin artırılması, təlim proseslərinin səmərəli təşkili və insan itkilərinin azaldılması baxımından strateji əhəmiyyət daşıyır [5].

Bu məqalənin məqsədi müasir müharibələrdə tətbiq olunan atəşlə zərərvurma taktikalarının süni intellekt əsaslı simulyatorlar vasitəsilə necə modelləşdirildiyini, bu texnologiyaların taktiki və strateji səviyyələrdə tətbiq imkanlarını və gələcək perspektivlərini elmi əsaslarla araşdırmaqdır.

**Metodlar.** Süni intellektlə təchiz olunmuş simulyatorlar döyüş mühitini virtual olaraq təkrarlamaqla real ssenariləri təlim məqsədilə modelləşdirməyə imkan verir. Bu simulyatorlar həm quru qoşunlarının, həm də pilotsuz uçuş aparatlarının atəş koordinasiyasını təhlil edir, optimal atəş nöqtələrini təklif edir və döyüş nəticələrinin simulyasiya əsasında qiymətləndirilməsinə imkan yaradır [2].

Simulyatorlar süni intellekt alqoritmləri ilə birlikdə aşağıdakı imkanları təmin edir:

- Hədəf seçiminin və prioritetləşdirilməsinin avtomatlaşdırılması;
- Sensor məlumatlarının emalı və situasiya analizi;
- Döyüş mühitinin real zamanlı proqnozlaşdırılması;
- Müxtəlif taktiki yanaşmaların nəticələrinin müqayisəli təhlili.

Bu araşdırma metodoloji olaraq analitik-sintez yanaşması, müqayisəli təhlil və praktik nümunələrin modelləşdirilməsi prinsiplərinə əsaslanır. Məqsəd, müasir müharibələrdə tətbiq edilən atəşlə zərərvurma taktikalarının süni intellekt simulyatorları ilə necə modelləşdirildiyini sistemli şəkildə təqdim etməkdir.

İlkin araşdırmalar göstərir ki, süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi Azərbaycan Ordusunda hədəflərin aşkarlanma sürətini 3 dəfə, Ukrayna ordusunda isə artilleriya zərbələrinin dəqiqliyini 75% artırmışdır. Bu göstəricilər, texnoloji üstünlüyün müasir müharibələrdə kritik rolunu aydın şəkildə nümayiş etdirir.

ABŞ, Rusiya, Çin və İsrail kimi ölkələr bu texnologiyaları müdafiə sistemlərinə inteqrasiya etməkdə lider mövqedədir. ABŞ Müdafiə Nazirliyi “Project Convergence” adlı proqram çərçivəsində Sİ simulyatorlarının döyüş analizində istifadəsini genişləndirir [3]. Rusiya isə “Era” texnoparkında süni intellekt əsaslı komanda idarəetmə sistemləri üzərində işləyir [6].

Azərbaycanda 2020-ci il Vətən Müharibəsindən sonra müdafiə sistemlərinin texnoloji modernləşdirilməsi prioritetlər sırasına daxil edilmişdir. Müdafiə Sənayesi Nazirliyi və Silahlı

Qüvvələrin təlim strukturları simulyasiya və pilotsuz sistemlərlə təchizat istiqamətində əməkdaşlıqları genişləndirməkdədir [5].

Müasir şəhər döyüşləri mühitində də süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının tətbiqi hərbi əməliyyatların effektivliyini və dəqiqliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırmaqla bərabər, mülki itkilərin minimuma endirilməsi baxımından da kritik rol oynayır. Şəhər mühitinin mürəkkəbliyi nəzərə alınaraq, süni intellekt sistemləri bu sahədə xüsusi çətinliklərin həlli üçün innovativ yanaşmalar təqdim edir.

Şəhər döyüşlərinin əsas çətinliklərindən biri olan hədəflərin dəqiq identifikasiyası problemi Sİ texnologiyaları vasitəsilə uğurla həll edilir. Kompüter görmə alqoritmləri mülki və hərbi obyektləri yüksək dəqiqliklə fərqləndirə bilir. Beynəlxalq Qırmızı Xaç Komitəsinin (ICRC) 2023-cü il hesabatında qeyd edildiyi kimi, müasir süni intellekt sistemləri bu cür identifikasiya əməliyyatlarında 96,7% dəqiqlik göstəricisinə çatır.

Real döyüş təcrübələri bu sistemlərin effektivliyini aydın şəkildə nümayiş etdirir. Ukraynanın Baxmut müdafiəsi əməliyyatlarında (2023) tətbiq edilən GIS Arta 2.0 sistemi artilleriya dəqiqliyini 78% artırmaqla yanaşı, kollateral ziyanı 43% azaltmağa və reaksiya vaxtını 12 dəqiqədən 3,5 dəqiqəyə qədər qısaltmağa müvəffəq olmuşdur.

Texnoloji baxımdan bu sistemlər bir sıra inkişaf etmiş komponentlərdən ibarətdir:

- Çoxnövlü sensor verilənlərinin inteqrasiyası (termal, optoelektronik, akustik və radar)
- Real-zamanlı 3D məkan analizi və digital twin texnologiyaları
- Avtomatik hədəf prioritzasiya mexanizmləri

2020-2023-cü illər üzrə statistik məlumatlar göstərir ki, süni intellekt sistemləri şəhər döyüşlərində aşağıdakı effektivlik göstəricilərinə nail olmuşdur:

- Şəhəratrafi ərazilərdə hədəf dəqiqliyi: 91%
- Sıx şəhər mühitində hədəf dəqiqliyi: 83%
- Sənaye zonlarında hədəf dəqiqliyi: 88%
- Mülki itki riskinin ümumi azalması: 38-43%

Gələcək inkişaf istiqamətləri sırasında aşağıdakı texnoloji yeniliklər xüsusi diqqət çəkir:

- Mikro dron sürülərinin koordinasiyası üçün swarm intellekt sistemləri
- Şifrəli rabitənin pozulması üçün kvant hesablama texnologiyaları
- Enerji səmərəliliyinin artırılması üçün neyromorfik çiplər [7].

Xüsusi olaraq qeyd etmək lazımdır ki, müasir şəhər döyüşlərində süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi hərbi əməliyyatların effektivliyinin artırılması və mülki itkilərin minimuma endirilməsi baxımından perspektivli istiqamət hesab edilə bilər.

**Nəticə və müzakirələr.** Nəticə olaraq, süni intellekt simulyatorlarının atəşlə zərərvermə taktikalarının təlim və tətbiqinə inteqrasiyası yalnız taktiki üstünlük qazandırmaqla qalmır, həm də real döyüş əməliyyatlarının planlaşdırılmasında və insan itkilərinin azaldılmasında mühüm rol oynayır. Bu texnologiyalar gələcək müharibələrin əsas komponentlərindən biri olmaqla yanaşı, hərbi-strateji düşüncə tərzinin dəyişməsinə də səbəb olacaq. Həmçinin, süni intellekt texnologiyalarının atəşlə zərərvermə taktikalarının modelləşdirilməsində istifadəsi müasir hərbi strategiyanın inkişafında mühüm rol oynayır. Simulyatorlar vasitəsilə müxtəlif döyüş vəziyyətləri sınaqdan keçirilə bilər, nəticələr analiz edilə bilər və daha effektiv, riskləri azaldan taktiki qərarlar formalaşdırıla bilər. Bu yanaşma gələcək müharibələrin texnologiya əsaslı olacağını və insan-süni intellekt əməkdaşlığının ordu strukturlarında mərkəzi yer tutacağını göstərir.

## Ədəbiyyat

1. Horowitz, M. C. (2018). *The Promise and Peril of Military Applications of Artificial Intelligence*. Bulletin of the Atomic Scientists, 74(6), 316–321.  
<https://doi.org/10.1080/00963402.2018.1535371>

2. Scharre, P. (2019). *Army of None: Autonomous Weapons and the Future of War*. W. W. Norton & Company.
3. Freedberg, S. J. (2020). *Army's Project Convergence Is The Future Of War*. Breaking Defense. <https://breakingdefense.com>
4. Department of Defense. (2020). *Integrated Visual Augmentation System (IVAS) Overview*. <https://defense.gov>
5. Azərbaycan Respublikası Müdafiə Nazirliyi. (2021). Vətən müharibəsi: Texnoloji təhlil. Bakı.
6. Galeotti, M. (2021). *Russia's military innovation and the role of AI*. European Council on Foreign Relations. <https://ecfr.eu>
7. Əliyev, Z. (2021). *Süni intellekt texnologiyalarının hərbi sahədə tətbiqi imkanları*. Bakı: Hərbi Nəşriyyat

## MODELING OF FIRE DESTRUCTION TACTICS IN MODERN WARFARE USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE SIMULATORS

Huseynov Y.Q

**Abstract.** *The nature of modern combat operations is changing rapidly. High-speed information processing, real-time decision-making requirements on the battlefield, and the race for technological superiority are the basis of military strategies. In this regard, it has become necessary to involve new technologies for more efficient and safe planning, analysis, and application of fire damage tactics. The integration of artificial intelligence (AI) technologies and simulation models, one of its main areas of application, into this process has become one of the important research directions of modern military science.*

*The main purpose of this article is to analyze on a scientific basis how fire damage tactics are modeled in modern wars using artificial intelligence simulators, the contributions of these technologies to combat tactics, and their application possibilities. By imitating real combat scenarios, simulators create broad opportunities for military personnel to increase their decision-making ability in various situations without high risk, and to optimize fire accuracy and target selection.*

*Artificial intelligence models process information received from sensors or intelligence data, determine the threat levels in the area, analyze possible enemy maneuvers, and offer optimal fire solutions in accordance with the scenario. This creates conditions for fast and effective decision-making in both static and dynamic combat conditions. Based on the results obtained, processes such as the correct distribution of fire resources, target prioritization, and changing combat positions can also be carried out automatically. The article also analyzes international experiences - including artificial intelligence-based fire simulators implemented by the USA, Russia, and Israel. AI-based systems used by NATO countries minimize the role of the human factor in combat management, creating conditions for more flexible and accurate operations. The application of such technologies in Azerbaijan has also gained relevance after the Patriotic War and has begun to be considered on a larger scale with the digital transformation projects of the Ministry of Defense Industry and relevant agencies.*

**Keywords:** *modern warfare, artificial intelligence, fire damage, simulators, combat tactics, modeling*

## AI MAINTENANCE SUPPORT FOR FLIGHT SIMULATORS: ENSURING FLIGHT TRAINING QUALITY



**Abdullayev Kh.B.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
khagani.abdullayev@naa.edu.az

**Abstract.** Aviation training is incomplete without flight simulators, which provide lifelike environments for piloting control practice and evaluation. However, technical issues that occur unexpectedly during simulator training can affect the continuation of training and its depth.

In this paper, we describe the development of an AI-based decision support system to help maintenance engineers diagnose and resolve technical faults more quickly. The machine mechanism uses historical maintenance records and textual descriptions of previous resolution data, entirely with Natural Language Processing (NLP) and semantic similarity models.

We aim at improving the fault management procedure so that a disruption of the training can be prevented and a high level of instruction quality is ensured. The system avoids unnecessary delays and enables quicker, meaningful decision-making based on data, to help maintain the integrity of flight education on simulators.

This study is also consistent with broader research agendas that seek to understand how AI can be used to evaluate and support educational quality in high-stakes technical environments.

**Keywords:** AI decision support system, flight simulator maintenance, fault diagnosis, NLP in engineering, educational quality, technical training, predictive maintenance

**Introduction.** Flight simulators are also used to train pilots for the real world and bring them to the condition of the aircraft in a safe virtual world simulation. Such systems emulate challenging in-flight situations, vulnerability to threats, and handling of systems and procedures that may be unsafe or prohibitively expensive in actual aircraft. Flight simulator uptime is thus an important consideration, with unplanned unavailability leading to interruptions to training, learning, and even certification cycles. The continued accessibility of these simulators contributes directly to maintaining the quality and effectiveness of aviation training.

The task of the maintenance engineer is vital for reducing the time a simulator is unavailable, but due to the increasing complexity and variety of simulators, the number of failures and technical malfunctions has increased rapidly. Defects can occur in the components of hardware, in software modules, and in data communication systems, for which timely correction is necessary to prevent disturbances. Traditional troubleshooting is heavily dependent on the experience and intuition of the engineer, which might be limited against new or rare fault scenarios. Manual fault detection techniques no longer work efficiently in highly technology-dependent training scenarios.

AI offers a solid foot in the door for engineering teams in this space. Leveraging large sets of historical maintenance data and recurring patterns, AI can dynamically highlight the most probable causes of faults and possible solutions. Natural Language Processing (NLP) in addition enables the solution to parse textual descriptions of historical maintenance cases, whereas semantic similarity models further help in linking new issues with resolved ones. It allows maintenance staff to share and benefit from common knowledge gained through many years of technical operations.

A system based on flight training continuity is deemed essential in high-risk learning environments like flight training in aviation, not only for operational efficiency but also to maintain the integrity of training and the instructional value delivered by simulators. Training disturbances

can have implications for learning, engagement, and increase trainee stress. Besides fixing errors, AI software is also likely to offer even more by forecasting possible breakdowns before they happen. Predictive maintenance can propose preventative maintenance actions by detecting early warning signals and finding critical components where a breakdown can occur.

Not only does this prophecy increase efficiency, but it also enhances the safety of training. Instead of having to deal with five unexpected simulator steering issues, for example, some early intervention could have reduced that to only one or two, significantly reducing the impact. Efficiency gains of this kind enable training centers to be more consistent, to allocate resources more effectively, and to maximize the utilization of expensive simulator assets.

Accordingly, this paper proposes an AI-supported decision support system to improve fault diagnosis and maintenance processes for flight simulators. The proposed system combines NLP of textual fault logs, categorical data, and successful resolution records to give sensible answers on likely cause or resolution. By doing so, engineering teams make faster, smarter decisions. Furthermore, this approach is consistent with other research in the use of AI for quality assessment and improvement of tailored technical study, where reliability, accuracy, and educational consistency are of paramount importance.

**Related work.** Artificial Intelligence (AI) applications in technical faults management have also been investigated in different industries, with aviation not being an exception. Particularly, predictive maintenance has been identified as a great innovation.

Patibandla presented the benefit of AI-driven predictive models to minimize unscheduled maintenance and operational costs in aviation domains. Moghadasnian expanded this work to include on-time sensor information, facilitating early detection of critical faults by increasing system reliability [1,2].

Though strides have been made for adaptive learning systems in educational technology products, the technical reliability of the simulator environments for such training has received relatively little focus. Nonetheless, the track record of simulators is something that must be maintained to maintain the quality of instruction, especially in high-stakes aviation learning environments.

Recently, NLP has been applied more and more to help fault diagnosis through textual data. Tunç et al. utilized BERT embeddings to calculate semantic similarity between bug reports and historical incidents and obtained effective retrieval of relevant instances [3]. Alfeo et al. further illustrated how deep transformer models may support technical personnel by analyzing diagnostic information in unstructured maintenance logs [4].

In light of these pioneering works, this study extends these previous contributions by proposing a hybrid support system likewise based on artificial intelligence technology and combined with case-based reasoning, targeted to flight simulator maintenance. Not only does the system provide fault-resolution assistance, it also predicts and foretells likely future failures using predictive modeling. This method also can be used to reduce training interruptibility and increase the quality of a flying environment.

**Methodology.** The developed AI-supported DSS consists of semantic analysis, similarity retrieval, and prediction modeling to assist maintenance engineers in the flight simulators. For the former, it is necessary to convert the textual information, like fault descriptions and engineer comments, into a numerical form. Text is cleaned and tokenized by NLP and is embedded with a pre-trained BERT model to extract the semantic context [5].

For ease of troubleshooting, we index our historical data using FAISS, a high-performance similarity search library [6,7]. Given a report on a new fault, the system compares its semantic embedding with existing fault vectors and retrieves the best matching past cases. This recovery



mechanism allows engineers to make new decisions more quickly, based on both contextual references and historical effective resolutions.

A predictive model is also included, against which the reactive response is compared for filtering, and which is trained on metadata like fault category, simulator module, and component types. This model is a predictor for potential failures in the short term. It lowers the number of unanticipated failures and ensures the simulators are available by warning engineers in advance.

To provide humanly understandable AI-driven decisions, the technique relies on SHAP (SHapley Additive exPlanations) values. SHAP computes importance scores on features for each prediction, enabling engineers to interpret the reason for recommendations [8].

These retrieval-based and predictive analytics not only guarantee immediate reactions to issues but also support looking ahead when planning for maintenance operations, thus improving both technical reliability and instructional continuity for flight training simulators.

**Conclusion.** The aim of this paper was to propose an AI-based DSS developed to help maintenance engineers diagnose faults in the area of flight simulators. Utilizing NLP, semantic similarity retrieval, and predictive risk analysis, the system upgrades the diagnostic efficiency and timely detects the technical problems that may interfere with aviation training. By introducing AI to this specialist maintenance process, the development illustrates how data-driven systems can bring greater reliability and learning value to simulator-based instruction.

One of the most important features of the proposed system is its use of retrieval-based methods, which allow engineers to access historical cases of fault descriptions and corrective actions that have actually worked. This "knowledge reuse" mechanism reduces the time required to make a decision and offers security in the selection of proven solutions. Further, the predictive model is not confined to simply reacting to failures, but instead allows for proactive maintenance scheduling that minimizes the number of unplanned failures. By preempting possible failures, engineers are also able to maintain simulators operational and support a more efficient use of training schedules, quality, and preparedness of pilots.

Adding explainability features in the form of SHAP values only increases the trustworthiness of the AI recommendations. By providing a view on how predictions are formed, users can be confident they are controlling the outcomes and understand the reasoning behind the AI's protein suggestion. Such interpretability is essential for safety-critical aviation settings in which safety and accountability are key, but also in which technicians need to be able to explain their actions to supervisors, regulators, trainees, and so on.

While the emphasis at present has been on the textual extraction and semantic processing of fault reports and the retrieval of similar past cases, these capabilities are by no means the limit of the system's potential. Future improvements could include configurable, direct connections to online telemetry from simulation hardware and software, multi-modal data sources such as image-based diagnostics and sensor data, advanced time-series modeling for component remaining life, and predictive maintenance. These enhancements would move the DSS forward as a holistic fault management engine with short-term troubleshooting and long-term strategic planning capabilities.

Further work also remains in applying and validating the system in real aviation academies. Measuring its effectiveness in minimizing downtime, maximizing maintenance workloads, and sustaining training "tail" will provide anecdotal evidence of value to all involved. Beyond technical results, organizational implications should be considered when adopting AI in maintenance operations in terms of changes in the workflow, the required competencies of engineers, and integration with the existing maintenance management systems.

In summary, the AI-based DSS that we present does not only advance the technological state of flight simulator maintenance, but it may contribute to a wider debate about artificial intelligence in high-stakes technical training environments. By increasing reliability, reducing unscheduled

maintenance, and encouraging quality instruction, such systems also support the ultimate goal of improving aviation training and training the next generation of pilots in an environment that is safe and operationally relevant.

### References

1. Moghadasnian, S. (2025). AI-powered predictive maintenance in aviation operations. In *Proceedings of 16th Advanced Research in Science, Engineering and Technology*
2. Patibandla, K. R. (2024). Predictive maintenance in aviation using artificial intelligence. *Journal of Artificial Intelligence General Science*, 4(1), 325–333.
3. Tunç, S., et al. (2023). Semantic similarity estimation for domain-specific data using BERT. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.18602>
4. Alfeo, A. L. A., Cimino, M. G. C. A., & Vaglini, G. (2021). Technological troubleshooting based on sentence embedding with deep transformers. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01777-5>
5. DevBytes. (2024). *Similarity search with FAISS: A practical guide to efficient indexing*. Medium. <https://medium.com/@devbytes/similarity-search-with-faiss>
6. Meta AI. (2025). *FAISS: A library for efficient similarity search and clustering of dense vectors* [Computer software]. GitHub. <https://github.com/facebookresearch/faiss>
7. Facebook Engineering. (2017, March 29). *Faiss: A library for efficient similarity search*. Engineering Blog. <https://engineering.fb.com/2017/03/29/data-infrastructure/faiss-a-library-for-efficient-similarity-search>
8. Datacamp. (2023). *An introduction to SHAP values and machine learning interpretability*. <https://www.datacamp.com/tutorial/introduction-to-shap-values>

## SÜNİ İNTELLEKTLƏ UÇUŞ SİMULYATORLARI ÜÇÜN TEXNİKİ XİDMƏT: UÇUŞ TƏLİMİNİN KEYFİYYƏTİNİN TƏMİN OLUNMASI

Abdullayev X.B.

**Xülasə.** Aviasiya təlimi uçuş simulyatorları olmadan tam hesab edilə bilməz, çünki onlar pilotaj bacarıqlarının tətbiqi və qiymətləndirilməsi üçün real mühitə yaxın şərait yaradır. Lakin simulyator təlimi zamanı gözlənilmədən yaranan texniki nasazlıqlar məşqlərin davamlılığına və keyfiyyətinə mənfi təsir göstərə bilər.

Məqalədə texniki xidmət mühəndislərinə nasazlıqları daha tez diaqnozlaşdırmaq və aradan qaldırmaqda kömək edəcək süni intellektə əsaslanan qərar dəstək sisteminin işlənməsi təsvir olunur. Təklif edilən mexanizm tarixi texniki xidmət qeydləri və əvvəlki nasazlıqların həlli üzrə mətn təsvirlərindən istifadə edir, tam şəkildə Təbiət Dili Emalı (NLP) və semantik oxşarlıq modellərinə əsaslanır.

Tədqiqatın məqsədi nasazlıqların idarə olunması prosesini təkmilləşdirmək, təlimin pozulmasının qarşısını almaq və yüksək səviyyəli tədris keyfiyyətini təmin etməkdir. Sistem lazımsız gecikmələrin qarşısını alır, məlumatlara əsaslanan sürətli və səmərəli qərar qəbul etməni mümkün edir və uçuş simulyatorlarında təhsilin bütövlüyünü qorumağa xidmət edir. Bu yanaşma həmçinin süni intellektin mürəkkəb texniki mühitlərdə tədris keyfiyyətinin qiymətləndirilməsi və dəstəklənməsi üzrə aparılan genişmiqyaslı elmi tədqiqatlarla uzlaşır.

**Açar sözlər:** süni intellekt, qərar dəstək sistemi, uçuş simulyatorlarının texniki xidməti, nasazlıqların diaqnostikası, NLP mühəndislikdə, tədris keyfiyyəti, texniki təlim, prediktiv texniki xidmət

## AN EXPLAINABLE AI APPROACH TO STUDENT GENDER PREDICTION: INSIGHTS FROM XGBOOST AND SHAP



**Sadigov I.Y.**

Baku Engineering University, Baku, Azerbaijan  
isadiqov@std.beu.edu.az



**Gasimov V.A.**

Baku Engineering University, Baku, Azerbaijan  
vaqasimov@beu.edu.az

**Abstract.** In this study, machine learning techniques were applied to predict student gender based on various behavioral, academic, and psychological factors. Several classification models including Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost were implemented and compared in terms of their predictive performance. Among these, XGBoost achieved the highest accuracy. To further improve model transparency and interpretability, SHAP (SHapley Additive Explanations) analysis was conducted. This allowed for a better understanding of how different features influenced the model's predictions. The use of SHAP provided valuable insights into the decision-making process of the model, making the results more explainable and reliable. The overall findings demonstrate the potential of combining machine learning with explainable AI techniques in educational research. This approach not only enhances predictive accuracy but also offers deeper understanding of patterns within student data, which can assist educational institutions and policymakers in making data-driven decisions.

**Keywords:** machine learning, gender prediction, educational data mining, explainable AI (XAI), SHAP analysis

**Introduction.** In recent years, the use of machine learning in educational research has gained significant attention. Educational institutions are increasingly looking for ways to analyze student data to gain meaningful insights that can help improve academic outcomes, understand student behavior, and personalize learning experiences [1]. One interesting area of study is the prediction of student characteristics, such as gender, based on behavioral and psychological factors. This research aims to explore how different student-related factors can be used to predict gender using machine learning techniques.

For this study, a dataset containing various student-related variables was used. These variables covered a range of aspects such as academic status, social media usage patterns, mental health indicators, and demographic information. Before building the models, the data underwent several preprocessing steps. Categorical variables were label encoded to convert them into numerical form suitable for machine learning algorithms [2]. The target variable for prediction was gender.

Three popular machine learning classification models were applied to the dataset: Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost. Each model was trained and tested on the data, and their performance was evaluated using key metrics such as accuracy, precision, recall, and F1-score. This allowed for a comparison of the models to determine which one performed the best in terms of predictive power [3].

Among the three models, XGBoost stood out by delivering the highest accuracy and overall performance [4]. XGBoost is known for its speed and performance in classification tasks, making it a suitable choice for this kind of prediction problem. However, while having a high-performing model is important, understanding why the model makes certain predictions is equally valuable, especially in educational research where ethical and explainable decision-making is critical.

To address this, SHAP (SHapley Additive Explanations) analysis was conducted on the XGBoost model. SHAP is a popular explainable AI (XAI) technique that helps to interpret complex machine learning models by showing how much each feature contributes to a specific prediction [5]. Two types of SHAP plots were generated: a global feature importance plot (bar plot) and a detailed beeswarm plot. These visualizations helped identify which factors had the most influence on the model's predictions and how each feature impacted individual predictions.

The results of the SHAP analysis provided valuable insights into the decision-making process of the XGBoost model. This added layer of interpretability makes the model's outcomes more trustworthy and understandable for educators, researchers, and policymakers.

Overall, this study demonstrates how machine learning models, especially XGBoost combined with SHAP analysis, can be effectively used to predict student characteristics and provide deeper insights into student data. It highlights the growing importance of explainable AI in educational data mining and opens the door for future research on student behavior prediction, personalized learning, and decision support systems in education.

**Literature Review.** Machine learning has increasingly been used to predict student characteristics by analyzing behavioral, academic, and psychological data. Previous studies have applied models like Logistic Regression, Random Forest, and Gradient Boosting to educational datasets, focusing on variables such as social media usage, academic performance, and mental well-being [6]. While much research has examined how excessive social media use affects academic outcomes or mental health, fewer studies have explored how these combined factors can predict demographic variables like gender. Datasets in this field often vary in size, structure, and feature complexity compared to the dataset used in this study. Although models like XGBoost and Random Forest have shown high predictive power in educational data analysis, the use of explainable AI techniques such as SHAP for interpreting model decisions remains limited in this domain [7]. Additionally, computational performance, including CPU vs. GPU training efficiency is rarely discussed in student-focused machine learning research [8]. This study aims to address these gaps by comparing different classification models, applying SHAP for feature importance interpretation, and providing insights into the predictive relationship between social media habits, academic factors, and student gender.

**Research method.** Dataset and Preprocessing. The dataset used in this study contains various student-related features, including academic, behavioral, and psychological factors. Before model training, unnecessary columns were removed, and categorical variables were label encoded to convert them into numerical form. The dataset was then split into training and testing sets to ensure reliable model evaluation [9].

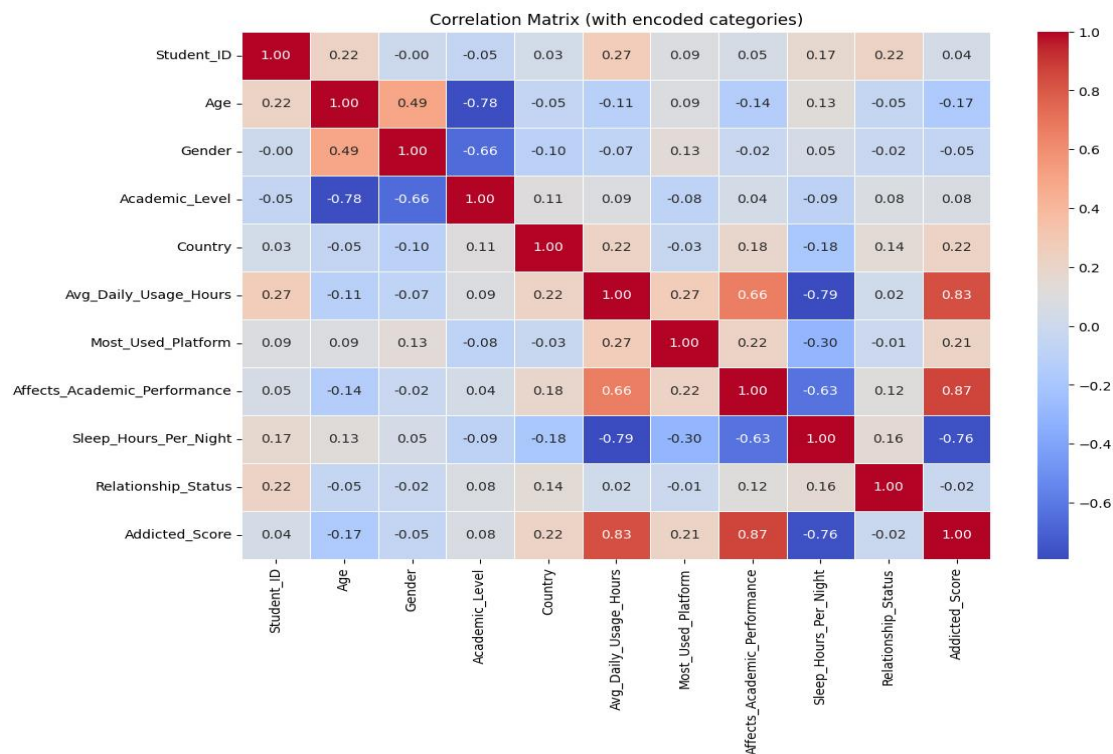


**Fig.1.** Correlation matrix of encoded dataset variables

Figure 1 shows the correlation matrix of the encoded dataset variables. A particularly strong positive correlation is observed between “Addicted\_Score” and “Avg\_Daily\_Usage\_Hours” ( $r = 0.83$ ), indicating that students who spend more time on social media also report higher addiction scores. Negative correlations, such as between “Sleep\_Hours\_Per\_Night” and “Addicted\_Score,” suggest that increased social media use may be associated with reduced sleep. The color intensity in the heatmap reflects the strength of these relationships, helping to identify dependencies and potential influences on gender prediction.

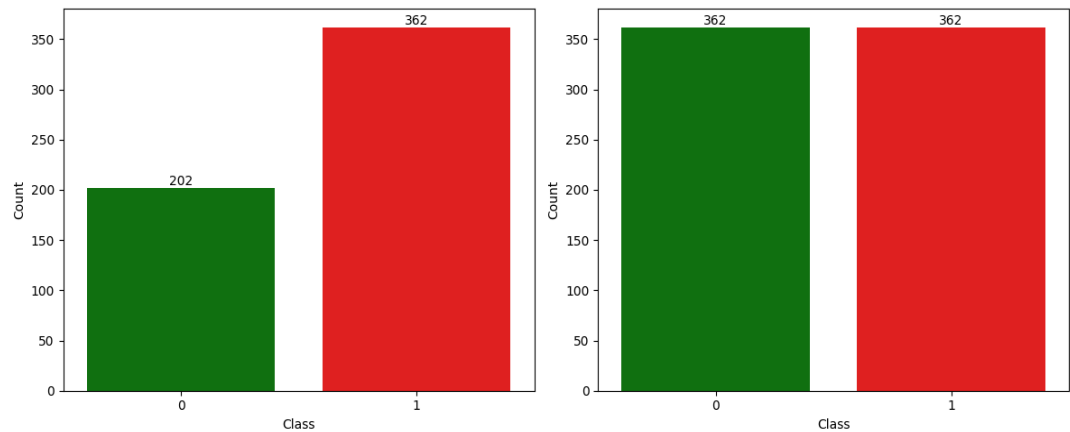


**Fig.2.** Class distribution before and after SMOTE

**Class distribution before and after SMOTE.** Figure 2 shows the class distribution before and after applying the SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) method to address class imbalance in the target variable. Before SMOTE, the dataset had an uneven distribution



between the two classes, which could negatively affect model performance [10]. After applying SMOTE, the classes were balanced, with an equal number of samples for each class. This step helps the machine learning models learn patterns from both classes more effectively and reduces bias towards the majority class.

**Model selection and training.** Three machine learning models were evaluated:

- Logistic Regression: A linear model serving as a baseline.
- Random Forest Classifier: An ensemble of decision trees improving robustness.
- XGBoost: A gradient boosting framework known for its high performance and efficiency.

The dataset was split into training and testing sets with an 80/20 ratio, maintaining class stratification to preserve the original distribution.

Special attention was given to training XGBoost using both CPU and GPU hardware to compare performance differences. The GPU version utilized the `device='cuda'` parameter for accelerated computation [3].

**Evaluation Metrics.** Model performance was assessed using:

- Accuracy: Overall correctness of predictions.
- Precision: The ratio of true positive predictions to total positive predictions.
- Recall: The ratio of true positive predictions to actual positives.
- F1-score: The harmonic mean of precision and recall.

These metrics were calculated separately for each class and averaged using macro and weighted approaches to account for class imbalance.

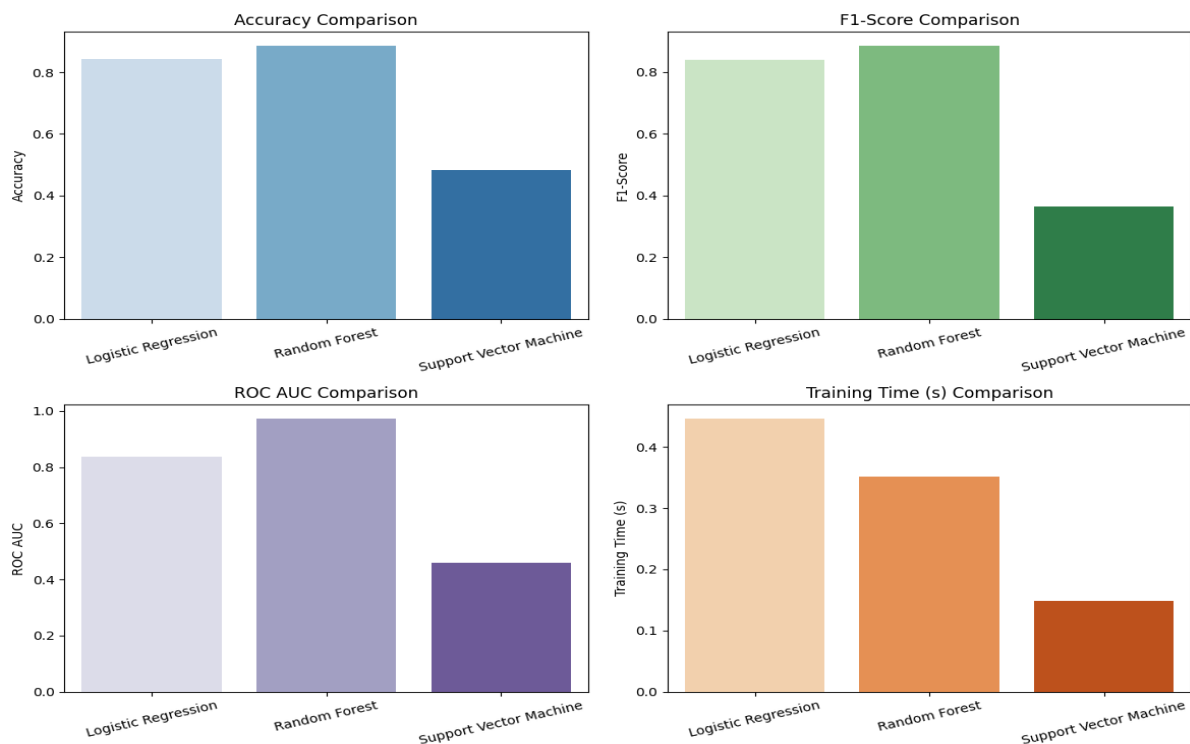


**Fig.3.** Comparison of classification models for student gender prediction

Figure 3 compares the performance of three classifiers—Logistic Regression, Random Forest, and Support Vector Machine (SVM)—in predicting student gender. The subplots illustrate four evaluation metrics: Accuracy, F1-Score, ROC AUC, and Training Time. Random Forest achieved the highest predictive performance across most metrics, particularly in ROC AUC and F1-Score, while Logistic Regression also performed competitively. In contrast, SVM showed lower predictive

accuracy but required the shortest training time, highlighting the trade-off between computational efficiency and model effectiveness.

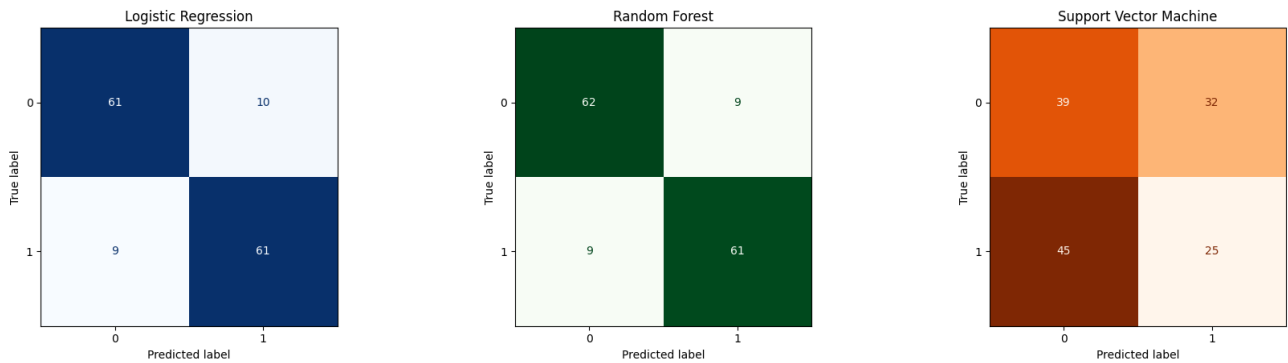


**Fig.4.** Confusion matrix comparison of Logistic Regression, Random Forest, and Support Vector Machine

**Confusion matrix comparison of models.** Figure 4 shows a side-by-side comparison of the confusion matrices for three models: Logistic Regression, Random Forest, and Support Vector Machine (SVM). Each matrix displays the number of correct and incorrect predictions for the two gender classes: "Male" and "Female." The diagonal cells represent correct predictions, while the off-diagonal cells show misclassifications [11]. This visual comparison helps highlight which model performed better at classifying each gender and where errors occurred.

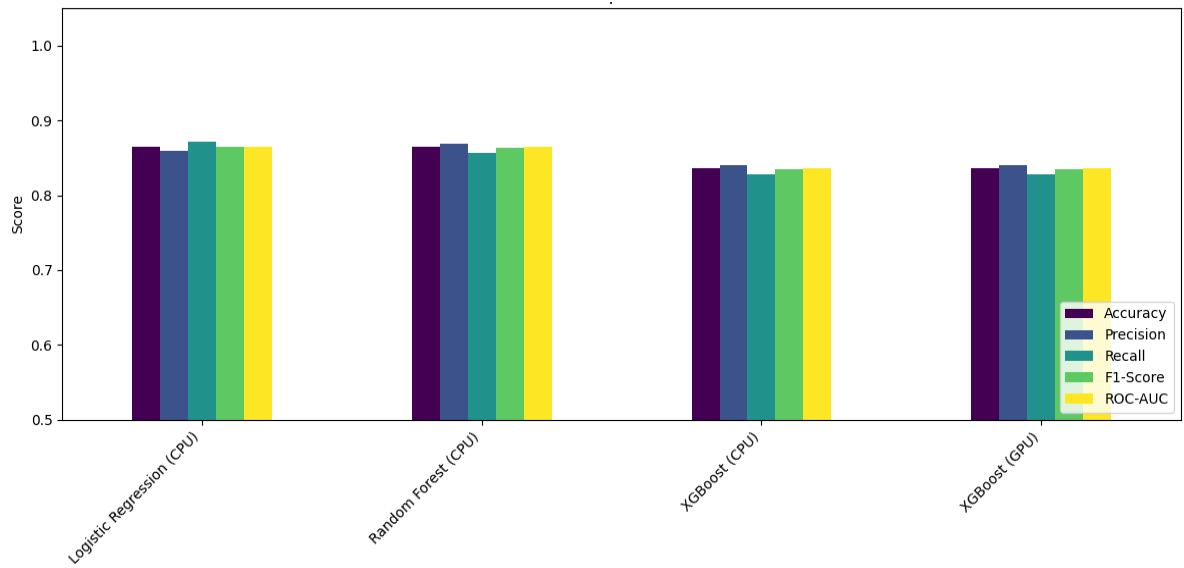


**Fig.5.** Comparison of Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost (CPU/GPU) for student gender prediction across Accuracy, Precision, Recall, F1-Score, ROC-AUC, and Training Time.

Figure 5 presents a comparative analysis of three machine learning models—Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost—on a dataset of students’ social media usage, lifestyle habits, and mental health scores. The models were evaluated using key performance metrics, including Accuracy, Precision, Recall, F1-Score, ROC-AUC, and Training Time (in seconds). Additionally, GPU acceleration was applied to XGBoost to highlight differences in computational efficiency compared to CPU training [5].

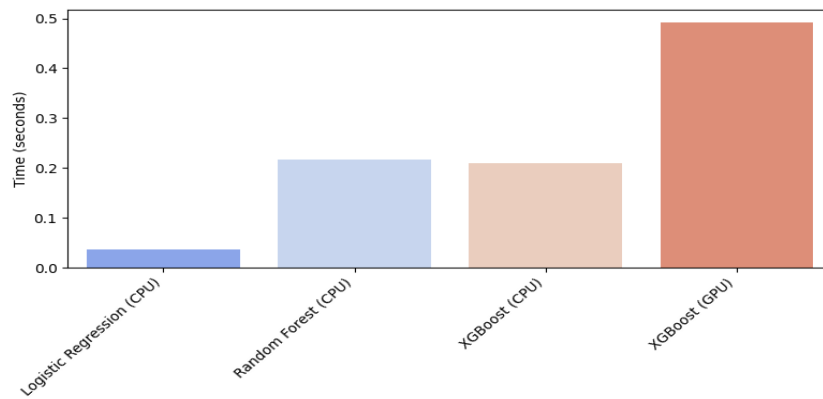


**Fig.6.** Training time comparison of Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost (CPU vs GPU). Logistic Regression was fastest, while GPU-based XGBoost required the longest time.

Figure 6 compares the training durations of the evaluated models. Logistic Regression achieved the shortest time because of its simple linear structure. Random Forest and XGBoost (CPU) needed moderately longer training due to tree-based computations. Interestingly, XGBoost (GPU) recorded the longest training time, which is likely caused by data transfer and initialization overhead. This finding suggests that GPU acceleration may not always be efficient on small datasets, even though it generally improves performance on larger ones.

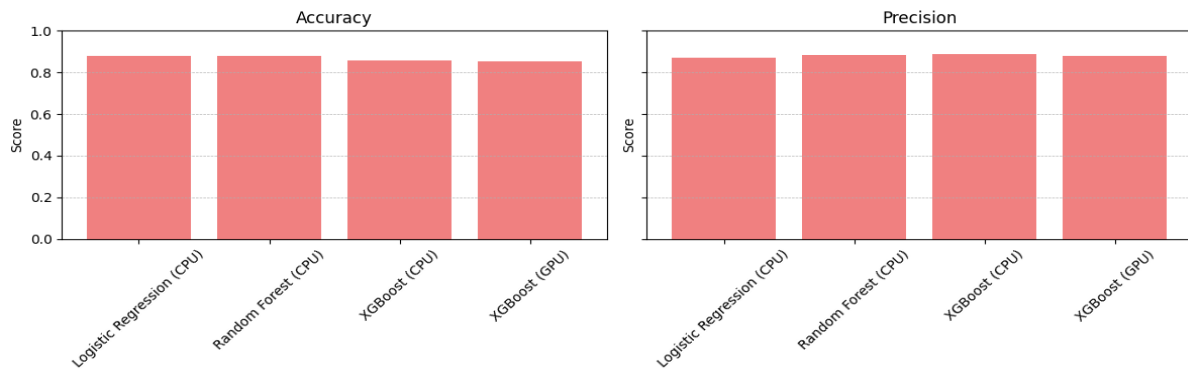


**Fig.7.** Accuracy and precision comparison of Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost (CPU vs GPU). All models achieved similar results, showing consistent performance across implementations.

Figure 7 compares the accuracy and precision scores of the evaluated models. Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost (both CPU and GPU) produced nearly identical values, with only minor differences between them. This consistency suggests that the choice of model or hardware had little effect on these two metrics for the given dataset. The results indicate that all classifiers were able to achieve stable and reliable predictions in terms of overall correctness and positive class identification.

Figure 8 illustrates the comparative performance of the classifiers in terms of recall, F1-score, and ROC-AUC. Logistic Regression and Random Forest achieved slightly higher recall values, while XGBoost (both CPU and GPU) showed comparable but marginally lower results. The F1-scores were nearly identical across all models, indicating balanced precision-recall performance. Similarly, ROC-AUC values demonstrated that all classifiers were effective at distinguishing between classes. These findings suggest that while tree-based models offer competitive results, Logistic Regression remained equally reliable for this dataset.

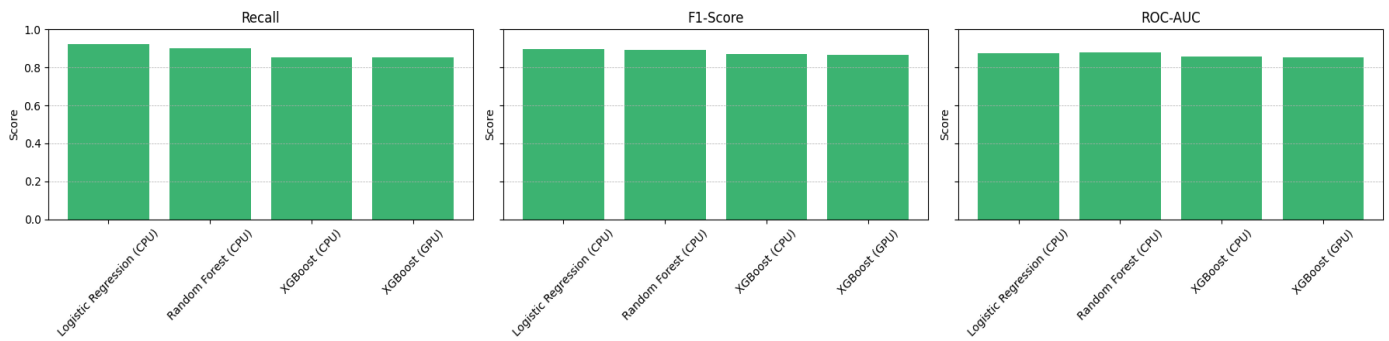


**Fig.8.** Recall, F1-Score, and ROC-AUC respectively comparison of Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost (CPU vs GPU). All models achieved similar results, with only slight variations across the three metrics.

**SHAP analysis:** identifying feature impact on model predictions. To further interpret and explain the behavior of the Random Forest model, SHAP (SHapley Additive explanations) analysis was performed. SHAP helps understand which features had the most influence on the model's decision-making process and how individual feature values contributed to predictions [12].

It shows the global importance ranking of features. The features with the highest mean SHAP values had the most overall impact on model output.

In this case, Academic Level, and Age were the top three most influential features.

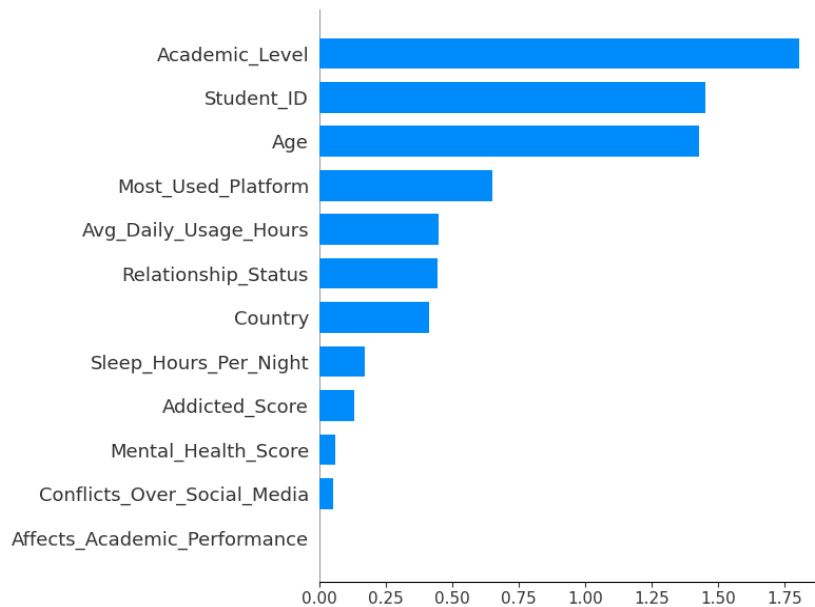


**Fig.9.** SHAP feature importance for gender prediction. Academic level, student ID, and age emerged as the most influential features, while social media conflicts and academic performance had minimal impact.

Figure 9 presents the SHAP feature importance values derived from the Random Forest model. Academic level was the strongest predictor, followed by student ID and age, indicating that demographic and educational variables had the highest influence on gender classification. Behavioral features such as average daily usage hours and most-used platform also contributed moderately to the model. In contrast, variables like conflicts over social media and academic performance showed negligible impact. These findings highlight the dominance of demographic and academic characteristics over behavioral factors in predicting student gender.

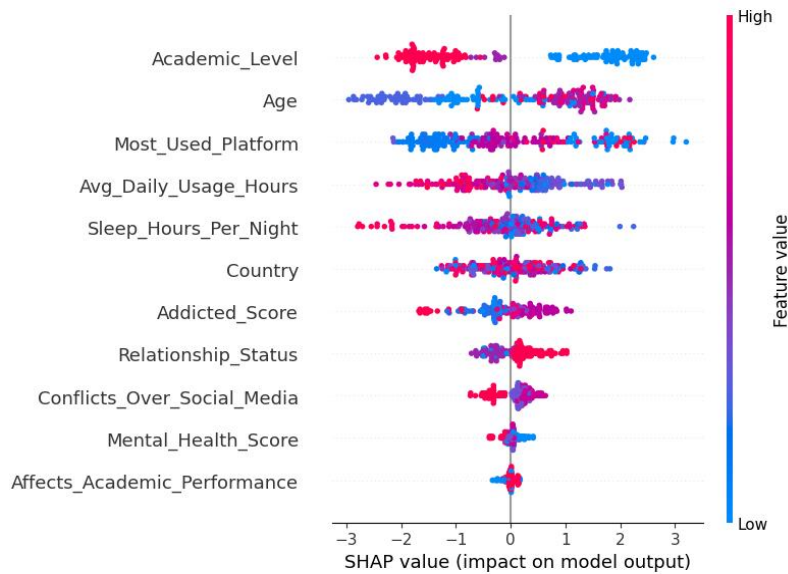


**Fig.10.** Figure 10. SHAP summary plot for feature impact on gender prediction. Academic level and age had the strongest influence, while variables such as academic performance and mental health score contributed minimally.

Figure 10 illustrates the SHAP summary plot, which shows how individual feature values influenced the model's predictions. Higher academic level and older age were positively associated with classification outcomes, while lower values of these features shifted predictions in the opposite direction. Behavioral variables, such as daily usage hours and sleep patterns, also had moderate influence, with red (high values) and blue (low values) indicating their directional impact. Features like academic performance and mental health score contributed little to the overall decision-making process. This visualization confirms that demographic and educational characteristics were the dominant drivers in the model's predictions, while psychosocial variables played only a secondary role.

**Conclusion.** In this study, we evaluated several machine learning classifiers for predicting student gender using social media behavior and personal characteristics. XGBoost achieved the most balanced and reliable performance across key metrics, including Recall, F1-Score, and ROC-AUC. To improve interpretability, we applied SHAP (SHapley Additive Explanations), a widely accepted method for explaining model decisions. The analysis revealed that academic level and age were the most influential features, while other behavioral and psychosocial factors played secondary roles. By combining strong predictive performance with explainability, our approach not only enhanced model transparency but also aligned with emerging trends in explainable AI, providing valuable insights for educational research.

## References

1. Dua, D., & Graff, C. (2019). UCI Machine Learning Repository: Heart Disease dataset [Data set]. *University of California, Irvine*.  
<https://doi.org/10.24432/C52P4X>
2. Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.  
<https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/file/8a20a8621978632d76c43dfd28b67767-Paper.pdf>
3. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785–794).



- <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
4. Kohavi, R. (1996). Scaling up the accuracy of Naive-Bayes classifiers: A decision-tree hybrid. In *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 202–207).  
<https://www.aaai.org/Papers/KDD/1996/KDD96-033.pdf>
  5. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.  
<https://jmlr.org/papers/volume12/pedregosa11a/pedregosa11a.pdf>
  6. He, H., & Garcia, E. A. (2009). Learning from imbalanced data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 21(9), 1263–1284.  
<https://doi.org/10.1109/TKDE.2008.239>
  7. Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321–357.  
<https://doi.org/10.1613/jair.953>
  8. Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). “Why should I trust you?”: Explaining the predictions of any classifier. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 1135–1144).  
<https://doi.org/10.1145/2939672.2939778>
  9. Zhang, Z., & Luo, X. (2018). Predicting heart disease with machine learning algorithms. In *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)* (pp. 1233–1242). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8621862>
  10. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32.  
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
  11. Quinlan, J. R. (1993). *C4.5: Programs for machine learning*. Morgan Kaufmann.  
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-22453-1>
  12. Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29(5), 1189–1232.  
<https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>

## İZAH EDİLƏ BİLƏN SÜNİ İNTELLEKT YANAŞMASI İLƏ TƏLƏBƏ CİNSİNİN PROQNOZLAŞDIRILMASI: XGBOOST VƏ SHAP ANALİZİ

Sadıqov İ.Y., Qasımov V.Ə.

**Xülasə.** Bu məqalədə tələbələrin sosial media davranışları və şəxsi xüsusiyyətləri əsasında cinsiyyətin proqnozlaşdırılması məqsədilə müxtəlif maşın öyrənməsi modelləri tətbiq edilmişdir. Logistic Regression, Random Forest və XGBoost alqoritmlərinin nəticələri müqayisə edilmiş, onların arasında XGBoost modeli dəqiqlik, F1-score və ROC-AUC göstəricilərinə görə ən balanslı performansı nümayiş etdirmişdir. Modelin qərarlarının izahını artırmaq üçün SHAP (SHapley Additive Explanations) yanaşmasından istifadə olunmuş və xüsusilə “Akademik səviyyə” və “Yaş” dəyişənlərinin ən təsirli amillər olduğu müəyyənəşdirilmişdir. Araşdırma göstərir ki, proqnozlaşdırma dəqiqliyi ilə yanaşı, izahlılığın təmin olunması təhsil sahəsində etibarlı nəticələrin əldə olunmasına və qərar qəbulətmənin dəstəklənməsinə mühüm töhfə verir.

**Açar sözlər:** machine learning, student gender prediction, educational data mining, explainable AI (XAI), SHAP analysis

## REDEFINING SPACE POWER: AI SATELLITES AND THE NEW MULTIPOLAR ORBITAL ORDER



**Shkurti Özdemir G.**

ETAI Center, Khazar University, Baku, Azerbaijan

gloriaozdemir@gmail.com, gloria.ozdemir@khazar.org

**Abstract.** AI-enabled small satellites now deliver sub-minute revisit imaging, autonomous change detection, and resilient LEO communications, all core capabilities for modern aerospace-monitoring systems. Miniaturization and reusable launchers have opened orbit to emerging states and private firms, while on-board artificial intelligence (AI) processes data in real time, shrinking the gap between observation and action. This paper traces how these twin trends, democratized access and edge-AI autonomy, are rewriting the international space race. A combined case study of Starlink's battlefield connectivity in Ukraine and China's AI-satellite doctrine illustrates how commercial networks and asymmetric strategies alike exploit AI constellations for surveillance, targeting, and strategic signalling. Civil applications such as AI wildfire detection underscore the dual-use breadth of the technology. The analysis concludes with governance implications for treaty law, private-public coordination, and risk mitigation.

**Keywords:** AI, orbital order, small satellites, new actors

**Introduction.** In 1969 it took a skyscraper-sized rocket and billions of dollars to plant a single flag on the Moon; today, backpack-sized CubeSats hitch bargain rides into orbit by the dozen, beaming down fresh data every few seconds. Furthermore, the time when just the United States (US) and the Soviet Union (SU) dominated the space race is long gone, with more than a dozen of states and non-state actors being part of the orbital order now. All these developments are highly connected to the current ongoing Fourth Industrial Revolution that has Artificial Intelligence (AI) at its center. All these have led to a plummeting of launch costs therefore enabling a multipolar, multi-actor orbital order. AI processors on satellites now turn raw imagery into actionable intelligence in-situ, reducing latency from hours to seconds, a change with profound geopolitical consequences.

To put into perspective how the orbital order, especially in terms of satellites launching, has changed it is necessary to look at the lowering launch costs and the rising numbers of satellites found now in the orbit. Specifically, when we look at the launching costs of satellites, in the mid-1960s NASA was paying north of \$100,000 for every kilogram lofted into orbit. The mighty Saturn V, introduced in 1967, slashed that bill to roughly \$5,400 per kg, yet progress soon stalled. From the 1970s through 2010, prices hovered around \$16,000 per kg for medium-to-heavy payloads and about \$30,000 per kg for lighter satellites, held back by legacy hardware, low launch cadence, stringent crew-safety demands, and traditional cost-plus contracting. SpaceX broke that pattern. Its partially reusable Falcon 9 (first flown in 2010) cut the cost to about \$2,500 per kg, and the heavier-lift Falcon Heavy (2018) lowered it further to roughly \$1,500 per kg—about thirty times cheaper than the Space Shuttle's debut price and an order of magnitude below the long-standing average. The fully reusable Starship system now in testing could push prices to about \$1,600 per kg initially, and, if the vehicle flies frequently, toward the \$100-150 per kg range. Looking further ahead, optimistic forecasts suggest costs might dip to around \$30 per kg by 2040; more conservative

scenarios put the figure nearer \$300 per kg if boosters can be reused only a handful of times. These plunging launch prices are redrawing the “orbital order,” opening space to a flood of small satellites and new commercial concepts, from mega-constellations for global broadband to in-orbit servicing, that would have been prohibitively expensive just a decade ago [1, pp. 2-3; 2].

Falling launch prices are clearly mirrored in the swelling satellite population. As Figure 1 (Panel A) shows, the number of operational spacecraft climbed to roughly 7,000 by 2022—a seven-fold increase since 2013—and, at the current pace, is on track to reach about 9,000 by 2025. OSCE figures indicate that just over half of the satellites aloft in 2022 (3,595 units) were smallsats in the 181–500 kg class. Most of these craft occupy low-Earth orbit and pursue commercial missions, which account for 78.6 percent of the total. Civil government payloads contribute around 10 percent, while military systems make up nearly 9 percent, as illustrated in Figure 1 (Panel B).

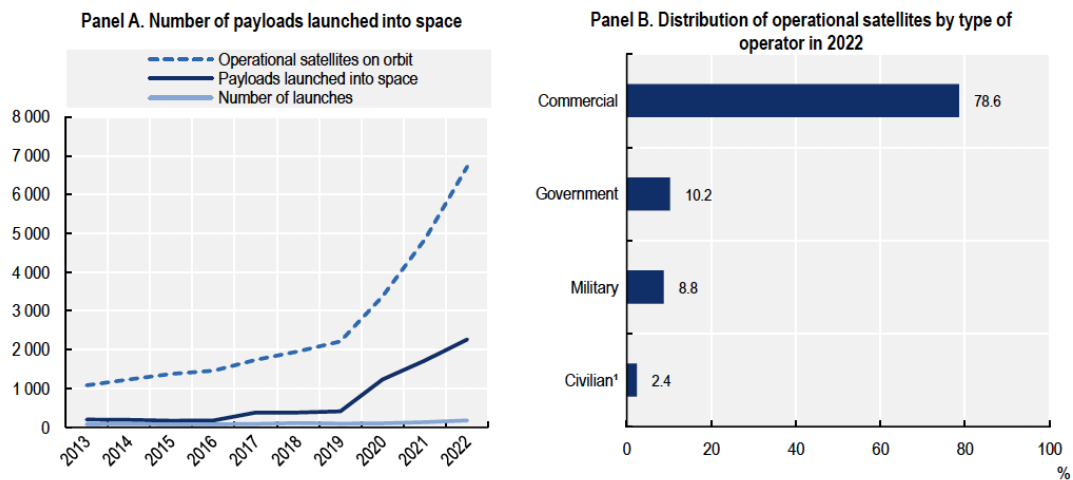


**Fig.1.** General overview of the satellites launched in space [3]

These developments set the stage for a fundamental shift in how power is projected and exercised in space. The convergence of artificial intelligence with affordable small-satellite constellations is reshaping the very calculus of space power—granting a widening circle of actors the ability to conduct near-instantaneous surveillance, maintain resilient communications, and enjoy unprecedented orbital autonomy. This paper explores that transformation in six parts: Section 2 traces the steep decline in launch costs and the rise of new state and non-state space actors; Section 3 examines the AI technologies enabling real-time processing and autonomy; Section 4 analyzes the implications of smart satellites in military and civilian domains, including their role in the war in Ukraine and China's evolving doctrine; Section 5 addresses the legal and governance challenges posed by these shifts; and Section 6 concludes with reflections on the future of space stability in an AI-driven orbital order.

**Democratization of orbit and the new actor mix.** Space has undergone a profound transformation, evolving from a tightly controlled arena dominated by a few Cold War superpowers into a complex, multipolar ecosystem marked by diverse actors, applications, and strategic logics. The launch revolution, driven by reusable boosters, mass production of small satellite components, and commercial rideshare services, has radically lowered the cost of space access. As discussed above, average launch prices have dropped considerably opening the orbital domain to a wide array of emerging states and private firms. The result is a reconfiguration of the “orbital order,” now characterized by hybrid public-private architectures, autonomous satellite operations, and algorithmically enhanced mission capabilities.

This shift is quantifiable. As of 2025, over 90 countries have launched at least one satellite into orbit, with 23 nations developing national rocket programs and 11 countries establishing domestic spaceports, many of which aim to attract international commercial missions [4, 3]. The

European Union and other multilateral entities have also begun to field space programs. While the United States continues to dominate—operating approximately 67% of all active satellites [3]—China, India, the UAE, Türkiye, and Brazil are rapidly expanding their presence. The UAE’s Rashid Rover and next-gen Thuraya AI imaging, India’s EO constellations for crop insurance and ISR, and Türkiye’s IMECE observation satellite reflect the increasingly sophisticated missions pursued by non-traditional powers.

Meanwhile, firms such as SpaceX, Planet Labs, GalaxySpace, and HEAD Aerospace deploy constellations of dozens or even hundreds of satellites. These companies offer not only raw data but turnkey analytics services that directly shape national policy, economic planning, and military operations. Planet, for example, operates over 200 CubeSats providing daily global imaging, while Chinese commercial firms export EO analytics and AI-enhanced imaging to clients across the Global South [5]. The result is a dynamic where space access no longer signals great-power status, it signals baseline capability for mid-tier influence.

As mentioned before, this democratization has paralleled a dramatic increase in orbital activity. From 2015 to 2022, annual launch attempts more than doubled, from 87 to 186, driven largely by commercial providers and rideshare missions. While Russia has maintained a steady cadence of 15-20 launches annually, the United States and China have surged, completing 78 and 64 launches respectively in 2022 [6]. As more countries gain access to small-satellite manufacturing, and as launch opportunities proliferate via shared platforms like SpaceX Transporter or ISRO’s PSLV-DL, the orbit becomes increasingly congested and competitive.

Equally significant is the shift in funding models. Global government space expenditures reached \$103 billion in 2022, with the U.S. and China accounting for 72% of the total [7]. However, the U.S. share has decreased from 76% in 2000 to 62% today, reflecting the diversification of investment across a broader set of state actors. Defense budgets in particular are increasing, as space becomes central to national security, early warning, and deterrence architectures. Yet perhaps the most consequential change lies in the commercial sector’s ascendance.

As of 2022, private companies own and operate more than 60% of all active satellites, surpassing governments as the dominant orbital actors [3]. SpaceX’s dual role as launcher and constellation operator, with its Starlink network providing internet and military communication services worldwide, exemplifies this new dynamic. Other firms, including Blue Origin, Boeing, and Virgin Galactic, are developing infrastructure for space tourism, in-orbit manufacturing, and private space stations. This shift has major implications not only for cost and innovation, but for strategic leverage, regulatory norms, and sovereignty.

**The innovation: access cycle in the space economy.** The current transformation is best understood through the innovation-access cycle that now drives the commercial space ecosystem. This cycle comprises three reinforcing stages: disruptive innovation, scaling and infrastructure maturation, and access diffusion. It begins with technological disruption, led by private firms developing reusable rockets (e.g., Falcon 9, Starship), standardized CubeSats, and AI-enhanced payloads. These platforms are built using 3D-printed parts, modular avionics, and edge-computing capabilities that reduce both mass and cost. As private operators integrate launch services, satellite fabrication, and ground control, they lower overhead and accelerate timelines. In the scaling phase, companies achieve higher launch cadences, which allow them to amortize R&D costs, reduce unit costs, and build out critical infrastructure such as launchpads, satellite-control centers, and cloud-based tasking APIs. The result is a new global logistics backbone that supports launch-on-demand, real-time tasking, and interoperable ground networks. Finally, this leads to access diffusion, wherein a much wider array of actors, mid-sized states, startups, academic institutions, and NGOs, can now enter orbit.

This diffusion is not only economic but politico-strategic. Countries once reliant on foreign launches can now establish sovereign space programs via rideshares. Commercial imagery and analytics services allow nations with no EO infrastructure to procure near-real-time geospatial intelligence. These new capabilities are then leveraged for foreign policy signaling, economic development, disaster relief, and defense, all enabled by market-driven orbital access.

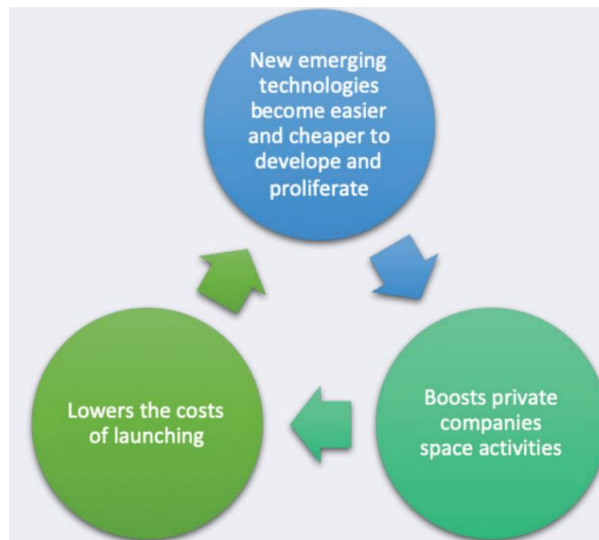


*Fig.2. The cycle of private sector involvement in the space ecosystem [8, p.14]*

Thus, the cycle of innovation, scaling, and access (as it can be seen in Figure 2) becomes a geopolitical force multiplier. Each round of technological advancement reduces costs, which in turn attracts more entrants, which creates new use cases and markets, thereby spurring further innovation. In this sense, the privatization of orbit is not a linear transition, but a recursive acceleration reshaping both the economics and the politics of space.

This section has shown how the democratization of orbit, fueled by plunging launch costs, emerging-state ambitions, and commercial disruption, has created a multi-actor, dual-use orbital landscape. The next section delves deeper into the AI technologies embedded in this new actor mix, and how they are redefining aerospace monitoring, situational awareness, and autonomous decision-making in orbit.

**AI small satellites for aerospace monitoring.** As the orbital domain becomes increasingly saturated, the intelligence of the satellite, rather than its mere presence, has become a key differentiator. Artificial intelligence (AI) is central to this evolution, transforming satellites from passive imaging devices into active, autonomous decision-makers capable of real-time data processing and task execution. This section examines how AI reshapes aerospace monitoring by reducing latency, enhancing in-orbit autonomy, and intensifying dual-use ambiguities.

**The strategic relevance of AI onboard.** Historically, satellites relied heavily on ground-based infrastructure for data processing, which introduced latency ranging from hours to even days. Today, the deployment of lightweight AI models directly onboard small satellites enables near-instantaneous inference. This dramatically cuts response times, transforming raw observations into actionable intelligence within seconds. Furthermore, by executing pre-processing and segmentation in situ, satellites reduce the volume of data that must be downlinked, alleviating pressure on ground-station infrastructure and expanding the operational bandwidth for other tasks.

Beyond faster data cycles, the rise of AI enables unprecedented levels of edge autonomy. Satellites can now retask themselves dynamically based on changing environmental conditions or emergent events. For instance, during active wildfire seasons, satellites equipped with computer vision models can autonomously detect early-stage plumes and cue higher-resolution imagers or



aerial firefighting units without human intervention. In constellation environments, AI even facilitates the handoff of targets between satellites, coordinating coverage to maintain persistent surveillance of critical zones. These capabilities render satellite constellations not only smarter but also collectively self-organizing, traits particularly important for time-sensitive applications such as disaster response or battlefield reconnaissance.

However, the same algorithms that empower civil response operations also support military targeting. Synthetic aperture radar (SAR) classifiers capable of mapping flood zones after hurricanes are equally adept at tracking the movement of armored columns through difficult terrain. This convergence of civilian and military functions introduces significant governance challenges. As satellites become increasingly software-defined, and mission parameters are reprogrammable from the ground, the boundary between peaceful and adversarial uses becomes highly fluid, often determined by context rather than configuration. The dual-use dilemma is no longer confined to payload design but extends deeply into the logic of onboard AI models and the infrastructure that supports them.

**Technological architecture and use cases.** The technical sophistication of AI-enabled small satellites can be understood through their key functional domains and corresponding machine learning architectures. Object and change detection, the foundational capability for most Earth observation tasks, now frequently employs Vision Transformers and pruned versions of YOLOv8. These models parse high-resolution satellite imagery into discrete patches, enabling fine-grained identification of changes in infrastructure, vegetation, or vehicle movement. Constellations such as Planet’s Pelican and China’s Jilin-1 Kuanfu have adopted these models to support persistent change detection missions.

For SAR image interpretation, convolutional neural networks (CNNs) combined with self-supervised learning techniques are increasingly used. These approaches allow satellites to extract meaningful patterns from unlabelled radar data, making them essential for operations in remote areas or during natural disasters when data labels may be unavailable. Finnish company ICEYE and U.S.-based Capella Space both utilize these models for near-real-time environmental and structural assessments.

In the maritime and radio-frequency (RF) domains, anomaly detection relies heavily on reinforcement learning. Satellites such as those deployed by HawkEye 360 use agents trained to detect deviations in expected signal patterns, which may indicate illicit maritime activity, illegal fishing, or jamming attempts. These AI models learn optimal scanning strategies that maximize detection sensitivity while conserving onboard resources.

Finally, constellation-level coordination is increasingly mediated by federated learning and graph-based reinforcement learning algorithms. These models allow satellites to share training updates without exchanging raw data, enabling joint model optimization while preserving bandwidth and data privacy. Starlink and OneWeb, for example, are experimenting with these techniques to optimize broadband routing and coverage in highly dynamic network topologies.

The successful deployment of these advanced models relies on a new class of embedded computing hardware. AI-capable chips such as Nvidia’s Jetson TX2 and Orin NX, Huawei’s Ascend AI processors, and custom-designed FPGAs—as in the Jilin-1 satellites—provide the necessary compute acceleration to run deep learning workloads in orbit. These devices strike a balance between performance, power consumption, and radiation tolerance, marking a significant leap in space-grade computational capability.

**Civilian applications: AI for the public good.** Although much of the discourse on AI-enabled satellites centers on defense and surveillance, civilian applications demonstrate the broader utility and societal value of these technologies. During the catastrophic 2024 wildfire season in Australia, a constellation of AI-enhanced CubeSats developed by Fireball International, in

partnership with CSIRO, achieved a notable breakthrough. These satellites detected ignition points and forecast plume movement up to 18 minutes faster than human spotters, a time advantage that directly translated into earlier dispatches of aerial firefighting tankers and improved containment efforts.

Similarly, in the domain of environmental monitoring, GHGSat's methane-detecting satellites exemplify how AI segmentation algorithms can support regulatory enforcement. In 2023, hyperspectral sensors processed via onboard AI flagged several super-emitter methane leaks over North America. Rather than waiting for ground analysis, the satellites autonomously sent alerts via SMS and cloud-based APIs to environmental regulators within hours of detection. These two cases, spanning climate response and emergency services, highlight how AI-powered satellites can augment state capacity, reduce disaster response times, and enhance environmental governance.

Crucially, these missions are often executed using the same core hardware and software stack as those supporting military operations. The algorithms used to detect forest fires are functionally similar to those identifying thermal anomalies from vehicle engines. The SAR classifiers that map urban flooding can also detect recent combat damage in cities. This functional overlap underscores the fact that modern small satellites are not strictly civil or military in their design, but are instead multi-domain assets whose classification shifts based on tasking, not construction. As such, legal frameworks built around binary mission categories may be increasingly inadequate in an age of reprogrammable, AI-driven space systems.

**The blurred boundaries of the dual-use mission set.** Modern aerospace monitoring relies on mission sets that span security, environmental, and humanitarian domains—often within the lifecycle of a single satellite. In the security and ISR context, satellites conduct activity mapping, real-time target cueing, and spectrum alerts to detect communications interference or covert transmitters. Simultaneously, the same constellations support civil monitoring functions, such as smoke detection during wildfires, methane-leak tracking over industrial zones, or change detection in land-use patterns for urban planning.

During natural disasters, AI-powered segmentation allows satellites to autonomously map flood zones, assess infrastructure viability, and optimize search-and-rescue routing—all without awaiting instructions from ground operators. These capabilities make small satellites indispensable for humanitarian missions. Yet, they also raise difficult questions: when the same hardware supports both rescue operations and military ISR within hours or days, how should international law, liability, and commercial licensing be adapted?

What emerges is a picture of satellite missions as inherently fluid and adaptive. AI empowers small satellites to switch roles rapidly in response to political, environmental, or tactical shifts. Rather than thinking of satellites as either “civil” or “military,” it is more accurate to view them as software-defined orbital agents—capable of rapid mission reconfiguration depending on upload instructions and environmental triggers. This functional ambiguity complicates arms control, data-sharing agreements, and attribution in conflict scenarios, especially when commercial constellations provide services to both state and non-state clients.

**Satellites in 21st-century warfare and security.** As orbital technologies evolve, the role of satellites in modern warfare has expanded from passive reconnaissance to active command, control, and combat-enabling infrastructure. The dual-use capabilities discussed earlier now materialize in real-world conflicts, where commercial constellations provide essential battlefield services, and state doctrines incorporate AI-enabled satellite systems into asymmetric deterrence strategies. This section examines two key cases, Starlink in Ukraine and China's evolving military space doctrine, to illustrate how aerospace monitoring has become central to contemporary conflict dynamics.

**Starlink and the Ukraine war: the internet-of-things of war.** Since the onset of Russia's full-scale invasion of Ukraine in February 2022, the Starlink satellite internet network has played a

pivotal role in maintaining operational coherence for Ukrainian forces. The first shipment of Starlink terminals arrived in Ukraine in late February 2022, just days after the conflict escalated. What began as a temporary communications patch quickly evolved into a critical component of the country's military infrastructure.

The operational effects were immediate and far-reaching. Starlink enabled low-latency command-and-control (C2) for unmanned aerial vehicles (UAVs), ground robotics, and artillery fire coordination, drastically improving battlefield responsiveness. Following widespread fiber-optic disruptions caused by missile strikes and sabotage, Starlink also served as a resilient backhaul network, ensuring continuity of encrypted communications even in isolated or degraded environments.

Perhaps most notably, the constellation supported the guidance and real-time video links of naval drone strikes, allowing Ukrainian forces to launch precision operations against Russian warships and coastal infrastructure in the Black Sea. In essence, Starlink facilitated what analysts have described as the "Internet-of-Things of War"—a networked battlespace where autonomous systems, mobile units, and command nodes are all linked via persistent satellite connectivity.

Russian forces quickly recognized the threat. By October 2022, they began targeted jamming attempts against Starlink uplinks in combat zones. In response, both Ukrainian and U.S. actors adapted software configurations and beam-forming protocols to preserve system integrity. However, this cooperation also raised questions about civilian control and strategic autonomy. In September 2023, a controversy erupted when Starlink's geofencing mechanisms reportedly blocked Ukrainian access in Crimea and portions of the Black Sea—effectively denying service during a key moment in naval operations. The episode underscored the latent power of private providers to modulate battlefield outcomes through geospatial service restrictions.

The centrality of Starlink to Ukraine's war effort was acknowledged publicly in April 2023, when the Ukrainian Ministry of Defense referred to the system as "the connective tissue of our forces," emphasizing that its contribution was not supplementary, but foundational. This case exemplifies how commercial satellite networks have evolved into strategic assets, capable of shaping warfighting capacity, national resilience, and even escalation dynamics.

**China's Asymmetric-Warfare Doctrine and the Militarization of Commercial Space.** While Ukraine's use of Starlink reflects a reactive and decentralized integration of commercial satellite infrastructure, China's approach to militarizing space is deliberate, centralized, and strategically asymmetric. The 2023 edition of the PLA's Science of Military Strategy includes a dedicated chapter on the concept of a "space information blockade," which explicitly frames commercial satellites not merely as enablers but as integral targets and tools in a future conflict, particularly one involving the United States [9]. The PLA envisions space not only as a supporting domain, but as a critical first-mover theater in any regional escalation scenario, especially around the Taiwan Strait or the South China Sea.

At the heart of this doctrine lies a tightly coordinated strategy of military-commercial fusion. State-linked firms such as Chang Guang Satellite Technology and HEAD Aerospace operate under dual mandates—developing ostensibly commercial constellations that can be rapidly plugged into PLA C4ISR systems in a crisis. Chang Guang's Jilin-1 video satellites have reduced latency between capture and downlink to as little as three seconds, enabling near-real-time tracking of mobile targets. HEAD Aerospace, meanwhile, advertises a "rapid tipping and cueing API" that permits responsive retargeting across multiple orbital assets—a capability that would be invaluable in the opening stages of conflict [10].

One of the most consequential applications of these technologies is their potential integration with autonomous drone swarms, a centerpiece of China's evolving intelligentized warfare concept. In a contingency involving U.S. carrier strike groups, for instance, PLA doctrine envisions using

AI-powered satellite constellations to dynamically re-image maritime formations, assess threat vectors, and cue long-range anti-ship ballistic missiles such as the DF-21D or DF-26. This kill chain could then be further refined by deploying drone swarms to saturate and confuse carrier defense systems, using satellite-provided target updates to coordinate flight paths and timing. The result is a multi-domain mesh of autonomous systems, synchronized via space-based AI infrastructure, that overwhelms traditional U.S. superiority in naval power projection.

Such a strategy offers asymmetric advantages. Rather than matching U.S. capabilities ship-for-ship or satellite-for-satellite, China leverages a dense, lower-cost constellation of dual-use commercial satellites augmented by onboard AI to compress sensor-to-shooter timelines [11]. Importantly, this approach complicates attribution and legal accountability. Because many of the platforms involved are technically civilian in origin, their use in kinetic targeting blurs the line between legitimate commercial activity and covert military coordination.

Beyond the operational level, this model also serves as a form of strategic signaling. The deliberate ambiguity of militarized commercial platforms lowers the threshold for escalation, deters pre-emptive strikes by introducing attributional uncertainty, and demonstrates to third parties—especially in the Global South—that commercial space autonomy can be leveraged for national defense without provoking immediate international backlash.

In essence, China's doctrine does not separate space, cyber, and autonomous systems—it integrates them into a unified framework of intelligentized, preemptive deterrence. The fusion of private-sector innovation with centralized military doctrine enables China to field a highly adaptive, fast-reacting, and politically deniable kill web, aimed not only at conventional dominance but at degrading the effectiveness of U.S. forces through informational and infrastructural disruption. As the PLA continues to refine this model, it sets the stage for a new form of orbital contestation—one where AI constellations serve as both shield and spear in a future conflict with peer adversaries.

**Implications for global governance.** The rapid integration of artificial intelligence into small satellite constellations has far outpaced the existing frameworks of international space law. As commercial actors assume increasingly strategic roles and satellite autonomy intensifies, foundational treaties, crafted for an era of intergovernmental prestige launches, now appear insufficient. This section identifies key legal and regulatory gaps, outlines the emerging dilemma of private-sector leverage, and proposes a path forward for future governance anchored in transparency, interoperability, and responsible AI principles.

One of the most significant gaps lies within the Outer Space Treaty (OST) of 1967 [12]. While the OST prohibits the placement of weapons of mass destruction in orbit and mandates that space be used for “peaceful purposes,” it remains silent on the autonomous functions of space-based systems. It does not address whether a satellite executing an AI-generated targeting decision constitutes an act of aggression, nor does it regulate the delegation of decision-making to machines in orbit. This absence of guidance is particularly troubling as AI-equipped satellites begin to autonomously detect, track, and cue kinetic operations.

The Liability Convention of 1972 further complicates matters by placing responsibility for damage caused by space objects on the launching state. However, in the era of privatized space, where companies operate global constellations with partial government oversight, determining culpability becomes opaque. If a commercial satellite owned by a multinational company contributes to an armed conflict, intentionally or not, through real-time imaging or targeting support, legal responsibility under existing treaties remains contested and ambiguous.

These gaps are not merely theoretical. The geofencing controversy involving Starlink's denial of service over Crimea and the Black Sea in 2023 underscores how private actors now wield strategic-level influence over operational theaters. The fact that a commercial CEO can unilaterally

restrict satellite access in a conflict zone, effectively becoming an ad hoc diplomatic actor, raises profound concerns about the delegation of strategic autonomy to unaccountable entities.

To address these challenges, several policy innovations should be considered. First, the United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA) should adopt an AI-specific annex to its Long-Term Sustainability (LTS) Guidelines, clearly outlining expectations for the use of autonomous systems in orbit [13]. This annex could include minimum standards for model transparency, fail-safe protocols, and limits on offensive functionality.

Second, a multilateral initiative could establish a “Space Transparency and Autonomy Registry” (STAR), where all satellite operators, public or private, disclose the autonomy level of their onboard systems. Much like ICAO registries in civil aviation or the Nuclear Suppliers Group in non-proliferation, such a mechanism would enhance trust, reduce misunderstanding, and provide early warnings of potentially escalatory deployments.

Third, a public-private incident response hotline should be established, modeled after Computer Emergency Response Teams (CERTs) in the cyber domain. This hotline would allow commercial satellite providers and national space agencies to rapidly communicate during crises, clarify intent, and coordinate mitigation steps when unexpected maneuvers or service disruptions occur.

Finally, these efforts must be normatively framed within the larger context of “responsible AI in defense.” Ongoing initiatives such as the U.S. Political Declaration on Responsible Military Use of AI and Autonomy and the REAIM (Responsible AI in the Military Domain) process provide a useful starting point. Integrating space-specific concerns into these frameworks would help align orbital governance with broader ethical and operational norms emerging in terrestrial conflict domains [14].

In summary, the current regulatory architecture does not reflect the technical realities or strategic stakes of AI-enabled orbital systems. As satellites gain the ability to autonomously switch roles, re-task missions, and serve both public and private masters, new governance models must be urgently developed to manage attribution, escalation, and civilian harm. Failing to do so risks transforming low Earth orbit into a domain of unmanaged brinkmanship.

**Conclusion.** The convergence of democratized hardware access and smart, autonomous payloads has redefined the foundations of space power. What once relied on thrust, payload mass, and national prestige now hinges on throughput, real-time inference, and software-defined versatility. AI-enabled small satellites represent a decisive shift in this calculus, empowering a wide array of actors, not just to observe, but to communicate, coordinate, and intervene from orbit.

The operational deployment of commercial networks like Starlink in Ukraine, and China’s incorporation of AI constellations into its military doctrine, reveal how satellite infrastructure is already being woven into the fabric of 21st-century warfare. These systems serve not only as eyes and ears but as command nodes, fire-control sensors, and information backbones. At the same time, their use in wildfire detection and environmental monitoring, as seen in Australia’s fire season and GHGSat’s methane alerts, demonstrates their immense value to civil society.

Looking ahead, the geopolitical implications are likely to intensify. The coming years may see the formation of regional nano-constellation alliances, as states seek shared orbital assets to augment collective security and disaster resilience. Commercial actors may increasingly function as quasi-sovereign communications and ISR providers, with the power to shape events through platform governance and geospatial service access. In parallel, a surge in counter-AI-satellite capabilities—ranging from electronic warfare and cyber exploits to orbital lasers and kinetic interceptors—could threaten the stability of these systems.

To manage this new orbital order, space governance must evolve rapidly and deliberately. Legal instruments must be updated to account for autonomy, AI functionality, and privatized



conflict support. Norms must be developed to clarify escalation pathways and minimize the risks of misattribution. Above all, the policy architecture must anticipate, not react to, the age of autonomy. Without such foresight, space may move from a domain of shared exploration to one of automated contestation, where the speed of AI outpaces the deliberation of diplomacy.

The next decade will be decisive. Whether the international community can craft new frameworks before widespread autonomy takes hold will determine if space remains a global commons or devolves into a theatre of accidental escalation and algorithmic brinkmanship.

## References

1. Jones, H. W. (2018). The Recent Large Reduction in Space Launch Cost. 48th International Conference on Environmental Systems. Albuquerque, New Mexico.  
<http://hdl.handle.net/2346/74082>.
2. Pethokoukis, J. (2024, March 26). Moore's Law Meet Musk's Law: The Underappreciated Story of SpaceX and the Stunning Decline in Launch Costs.  
<https://www.aei.org/articles/moores-law-meet-musks-law-the-underappreciated-story-of-spacex-and-the-stunning-decline-in-launch-costs/>.
3. OECD. (2024). The Space Economy in Figures. Paris: OECD.  
[https://www.oecd.org/en/publications/the-space-economy-in-figures\\_fa5494aa-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/the-space-economy-in-figures_fa5494aa-en.html).
4. CIA. (n.d.). Space agency/agencies.  
<https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/space-agency-agencies/>.
5. Frąckiewicz, M. (2025, June 1). Global Satellite and Space Industry Report 2025: Market Overview and Outlook to 2030.  
<https://ts2.tech/en/global-satellite-and-space-industry-report-2025-market-overview-and-outlook-to-2030/>.
6. McDowell, J. (2023). Space Activities in 2022. Retrieved from  
<https://planet4589.org/space/papers/>.
7. NovaSpace. (2022, December 15). New Record in Government Space Defense Spendings Driven by Investments in Space Security and Early Warning.  
<https://nova.space/press-release/new-record-in-government-space-defense-spendings-driven-by-investments-in-space-security-and-early-warning/>.
8. Shkurti Özdemir, G. (2024). Assessing Türkiye's Role in the Global Space Competition. İstanbul: SETA.  
<https://www.setav.org/en/assessing-turkiyes-role-in-the-global-space-competition/>.
9. PLA Academy of Military Sciences. (2023). Science of Military Strategy [军事战略学]. Beijing: Academy Press.
10. Chang Gang Satellite Technology Co. (2023). Jilin 1 Satellite: Revolutionizing Earth Observation Technology.  
<https://www.jl1global.com/jilin-1-satellite-revolutionizing-earth-observation-technology.html>.
11. Shkurti Özdemir, G. (2024). AI Arms Dynamics: The Rivalry between the US and China. İstanbul: SETA.
12. United Nations. (1967). Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies (Outer Space Treaty),  
<https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/introouterspacetreaty.html>.
13. United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). (2019). Guidelines for the Long-Term Sustainability of Outer Space Activities,  
[https://www.unoosa.org/documents/pdf/PromotingSpaceSustainability/Publication\\_Final\\_English\\_June2021.pdf](https://www.unoosa.org/documents/pdf/PromotingSpaceSustainability/Publication_Final_English_June2021.pdf).

14. REAIM. (2023). Responsible AI in the Military Domain: Summit Outcome Document. Ministry of Foreign Affairs of the Netherlands.  
<https://www.reaim2023.org>.

## KOSMİK GÜCÜN YENİDƏN TƏSVİRİ: SÜNİ İNTELLEKT PEYKLƏRİ VƏ YENİ ÇOXQÜTLÜ ORBİTAL NİZAM

Shkurti Özdemir G.

**Xülasə.** Süni intellektlə təchiz olunmuş kiçik peyklər artıq bir dəqiqədən az müddətdə yenilənən görüntülər, avtonom dəyişiklik aşkarlanması və dayanıqlı LEO (aşağı Yer orbitində) rabitə imkanları təqdim edir. Bunlar müasir aerokosmik müşahidə sistemləri üçün əsas funksiyalardır. Miniaturlaşma və təkrar istifadəli buraxılış sistemləri orbitə yeni dövlətlər və özəl şirkətlər üçün qapı açıb, peyklərin üzərindəki süni intellekt (Sİ) isə məlumatları real vaxtda emal etməklə müşahidə və tədbir arasındakı boşluğu azaldır. Bu məqalədə bu iki tendensiyanın – demokratikləşmiş çıxış və edge-Sİ (sərhəd süni intellekti) avtonomiyasının – beynəlxalq kosmik yarış qaydalarını necə yenidən yazdığı araşdırılır. Ukraynada Starlink-in döyüş meydanı bağlantısı və Çinin süni intellekt peyk doktrinasını əhatə edən birgə hadisə təhlili göstərir ki, həm kommersiya şəbəkələri, həm də assimetrik strategiyalar müşahidə, hədəfləmə və strateji signal ötürmək məqsədilə Sİ peyk qruplaşmalarından istifadə edir. Süni intellektlə meşə yanğınlarının aşkarlanması kimi mülki tətbiqlər bu texnologiyanın ikili təyinatlı (həm hərbi, həm mülki) potensialını göstərir. Təhlil sonda müqavilə hüququ, dövlət-özəl əməkdaşlığı və risklərin azaldılması baxımından idarəetmə nəticələri ilə yekunlaşır.

**Açar sözlər:** süni intellekt, orbital nizam, kiçik peyklər, yeni aktorlar

## SÜNİİNTELLEKTİN SOSIAL VƏ HÜQUQİ PROBLEMLƏRİ



**Məmmədza M.Ə.**

Azərbaycan İdman Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
mujkan@mail.ru



**Məmmədova L.M.**

Bakı Qızlar Universiteti, Bakı, Azərbaycan  
lamanmammadli08@mail.ru

**Xülasə.** Məqalədə süni intellektin sosial və hüquqi problemlərindən bəhs olunur. Belə ki, süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının sürətli inkişafı müasir cəmiyyətin müxtəlif sahələrində – iqtisadiyyat, səhiyyə, təhsil, hüquq və s. – geniş tətbiq imkanları yaratmışdır. Bununla yanaşı, bu texnologiyalar sosial və hüquqi müstəvidə bir sıra mühüm problemləri də gündəmə gətirmişdir. Bu məqalədə süni intellektin yaratdığı əsas sosial və hüquqi problemlər araşdırılır, bu problemlərin səbəbləri və mümkün həll yolları müzakirə olunur.

Sosial müstəvidə süni intellektin tətbiqi bir sıra narahatlıqlara səbəb olmuşdur. İlk növbədə, əmək bazarında avtomatlaşdırma nəticəsində bir çox peşələrin ləğvi və işsizliyin artması riski diqqət mərkəzindədir. Bu, sosial bərabərsizliklərin dərinləşməsinə və yeni sosial təbəqələşmə formalarının yaranmasına gətirib çıxara bilər. Eyni zamanda, süni intellektə əsaslanan alqoritmlərin irqi, cinsi və ya sosial ayrı-seçkilik yaratma ehtimalı mövcuddur. Alqoritmik qərarların şəffaf olmaması isə istifadəçilərin hüquqlarını necə müdafiə edəcəyinə dair suallar doğurur. Süni intellektlə işləyən sistemlərin insan davranışına təsiri, sosial münasibətləri dəyişdirməsi və etik dəyərlərlə ziddiyyət təşkil etməsi də bu kontekstdə əhəmiyyətli problemlərdən biridir.

Hüquqi baxımdan isə süni intellektin tənzimlənməsi kifayət qədər yeni və mürəkkəb bir sahədir. Ən vacib məsələlərdən biri hüquqi məsuliyyətin müəyyən olunmasıdır: süni intellektin qərar və ya hərəkətlərindən irəli gələn zərərlərə görə kim cavabdeh olmalıdır – proqramçı, istifadəçi, yoxsa texnologiyanın özü? Bundan əlavə, süni intellektin müəlliflik hüququ, patentləşmə və şəxsi məlumatların qorunması sahəsində yaratdığı qeyri-müəyyənliklər də hüquqi boşluqların mövcudluğunu göstərir. Məhkəmə sistemində süni intellektin istifadə olunması – məsələn, qərarların verilməsində və ya risk analizlərində – hüquqi ədalət və neytrallıq prinsipinə necə təsir göstərir, bu suallar da hazırda geniş müzakirə mövzudur.

Sonda qeyd etmək lazımdır ki, süni intellekt texnologiyalarının davamlı və etik istifadəsini təmin etmək üçün sosial və hüquqi çərçivələrin təkmilləşdirilməsi vacibdir. Bu məqsədlə beynəlxalq əməkdaşlıq, normativ hüquqi baza yaradılması və ictimai maarifləndirmə tədbirləri mühüm rol oynayır. Yalnız bu yanaşmalar sayəsində süni intellektin cəmiyyətə fayda gətirən, eyni zamanda insan hüquq və azadlıqlarına hörmət edən şəkildə inkişafı təmin oluna bilər.

**Açar sözlər:** süni intellekt, sosial problemlər, hüquqi məsuliyyət, əmək bazarı, süni intellekt və hüquq

**Giriş.** Müasir dövrdə süni intellekt texnologiyalarının sürətlə inkişafı və gündəlik həyatın müxtəlif sahələrinə nüfuz etməsi ilə bərabər, insan hüquqları və azadlıqları məsələsi yeni müstəviyə

keçmişdir. Övvəllər yalnız texnoloji yenilik kimi dəyərləndirilən süni intellekt, indi ictimai münasibətlər sistemində qərar qəbul etmə, nəzarət, informasiya axını və məsuliyyət bölgüsü kimi fundamental anlayışları dəyişdirmək gücünə malikdir. Bu texnologiyanın tətbiqi bir tərəfdən effektivlik və rahatlıq vəd edirsə də, digər tərəfdən hüquqi və etik seçimləri dərinləşdirir. Xüsusilə əmək münasibətlərində və informasiya təhlükəsizliyi sahəsində süni intellekt sistemləri birbaşa insanın fərdi məkanına müdaxilə potensialına malikdir. İş yerlərində tətbiq edilən avtomatlaşdırılmış nəzarət sistemləri əməkdaşların davranışlarını və məhsuldarlığını daimi şəkildə izləyir, bununla da şəxsi sərbəstlik və peşə azadlığı kimi hüquqlara təsir göstərir. Eyni zamanda, onlayn platformalarda kontentin filtrləsi olunması və avtomatik senzura mexanizmləri bəzi hallarda ifadə azadlığının və plüralizmin boğulmasına səbəb olur. Mütəxəssislər və insan hüquqları müdafiəçiləri haqlı olaraq bildirirlər ki, süni intellektin bu cür geniş tətbiqi hüquqi çərçivələr və etik prinsiplərlə düzgün şəkildə tənzimlənmədikdə, demokratiya və vətəndaş azadlıqları üçün ciddi risklər meydana çıxır. Azərbaycan kontekstində isə bu problemlər daha aktualdır. Çünki ölkədə süni intellektin hüquqi statusu hələlik müəyyənləşdirilməyib, bu texnologiyaların tətbiqindən doğan hüquqi nəticələr və məsuliyyət formaları qanunvericilikdə dəqiq ifadə olunmayıb. Nəticədə, AI tərəfindən törədilən potensial zərərin kim tərəfindən kompensasiya ediləcəyi, hansı hallarda hüquqi məsuliyyətin yaranacağı, şəxsi məlumatların necə qorunacağı kimi suallar açıq qalır. Hüquqşünaslar süni intellekt sistemlərinin məsuliyyətinin, əsasən, onların sahibləri və ya yaradıcısı olan proqram təminatçılmasına aid edilməsinin zəruri olduğunu qeyd etsələr də, bu məsələdə praktik və normativ aydınlıq hələ tam formalaşmayıb [1].

**Metodlar.** Süni intellektin tətbiqi dünyada genişlənməkdədir. Beynəlxalq Əmək Təşkilatının və digər analitiklərin hesabatlarına görə, avtomatlaşdırma və robotlaşma istehsal proseslərini sürətləndirdiyi üçün iş yerlərinin azalmasına və işsizlik riskinin artmasına səbəb ola bilər. BMT-nin Ticarət və İnkişaf Konfransı (UNCTAD) isə süni intellektin iqtisadi artımı özü-özlüyündə təşviq etmədiyini, inklüziv inkişaf üçün mövcud infrastruktur, təhsil və qanunvericilik çərçivələrinə əlavə investisiyaların lazım olduğunu xəbər verir. Bu qlobal vəziyyət Azərbaycana da təsir edir. Məsələn, ölkəmizdə səhiyyə, enerji, təhsil, kənd təsərrüfatı və digər sahələrdə süni intellekt pilot layihələri reallaşdırılır. Ölkədə genişzolaqlı internetin inkişafı və məlumat mərkəzlərinin yaradılması kimi texnoloji infrastruktur layihələri sürətlənib, bu da süni intellektin tətbiqinə zəmin yaradır [2].

Süni intellekt insan əməyinin əvəzlənməsinə səbəb olaraq əmək bazarında struktur dəyişiklikləri yarada bilər. Analitik mənbələr göstərir ki, süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi nəticəsində dünya üzrə işsizlik problemləri artmaqda davam edəcək. Məsələn, bank sektorunda bir sıra institutlar süni intellektdən istifadə ilə işçi heyətinin 10%-ə qədər ixtisar edilməsi planlaşdırılır; növbəti beş ildə 200 minə qədər bank işçisi AI tərəfindən əvəz oluna bilər. Bu isə bir tərəfdən effektivliyi artırsa da, işsizlər təbəqəsində sosial risklərin güclənməsi ilə nəticələnə bilər.

Təhsil sahəsində süni intellektin tətbiqi böyük imkanlar yaradır. Avtomatlaşdırılmış qiymətləndirmə sistemləri tələbələrin cavablarını obyektiv və sürətli şəkildə qiymətləndirir, müəllimlərin iş yükünü azaldır. Eyni zamanda, adaptiv öyrənmə proqramları tələbələrin fərdi ehtiyaclarına uyğun tədris materialları təqdim etməklə təhsilin səmərəliliyini artırır. Lakin bu proses problemlərsiz getmir, qiymətləndirmənin etibarlılığı, məlumatların məxfiliyi, etik prinsiplər və texnoloji infraqurkturla bağlı məsələlər öz aktuallığını qoruyur. Məsələn, avtomatlaşdırılmış sistemlərin qərar qəbul etmə mexanizmləri yetərinə şəffaf olmadığından onların nəticələrinə olan inam hələ tam bərpa edilməyib [3].

Süni intellekt sistemləri fərdi həyatı və azadlıqları məhdudlaşdırma bilən alətlərdən istifadə edir. İş yerlərində geniş tətbiq olunan AI-əsaslı nəzarət sistemləri (məsələn, əməkdaşların fəaliyyətinin monitorinqi) işçi hüquqlarını və şəxsi azadlıqları təhdid edə bilər. Onlayn məzmunun avtomatlaşdırılmış filtrləsiyası da demokratik ifadə azadlığına ziyan vura bilər: aparıcı tədqiqatçılar qeyd edir ki, bəzi avtoritar ölkələrdə süni intellektə əsaslanan kontent filtrləsiya alətləri tənqidi və

müxalif fikirləri senzura edərək vətəndaşların müstəqil informasiya mənbələrinə çıxışını məhdudlaşdırır. Ümumilikdə süni intellektin etik cəhətdən nəzarətsiz tətbiqi ayrı-seçkiliyin artması və insanların məlumatlarının sui-istifadəsi kimi riskləri yüksəldir.

Azərbaycan qanunvericiliyində süni intellekt hələlik hüququn subyekti kimi tanınmır, yəni AI birbaşa məsuliyyət daşıya bilmir. Belə olan halda, süni intellektin vurduğu zərərə görə məsuliyyətin kimdə olması sual altındadır. Hüquqşünaslar bildirir ki, bu vəziyyətdə tətbiq olunan ziyanın məsuliyyəti süni intellektin sahibinə və ya yaradıcısına (developer) aid edilməlidir. Yəni zərər yuxarı səviyyədə təqsirsiz məsuliyyət əsasında hesablanmalıdır. Lakin hazırda milli qanunvericilik bu münasibətləri aydın şəkildə tənzimləmir və vahid tətbiq təcrübəsi formalaşmayıb. Bu hüquqi boşluqlar süni intellektlə bağlı iddiaların məhkəmə müstəvisində həllini çətinləşdirir.

Süni intellekt sistemləri böyük həcmdə fərdi məlumatın toplanması və emalını tələb etdiyindən şəxsi informasiyaların qorunması mühüm hüquqi çətinliklərə səbəb olur. Araşdırmalarda qeyd olunduğu kimi, süni intellektə fərdi məlumatların etibarlı mühafizəsi əksər hallarda təmin olunmur. Bu isə şəxsi həyatın məxfiliyinin pozulması və kiberhücum risklərinin artması kimi nəticələrə gətirib çıxara bilər. Hüquq sahəsində çalışanlar bildirirlər ki, belə halların qarşısının alınması üçün mövcud məlumat təhlükəsizliyi qanunvericiliyinin təkmilləşdirilməsinə ehtiyac var. Süni intellektin geniş tətbiqi yeni qanunvericilik təşəbbüslərini tələb edir. Bir sıra ekspertlərin fikrincə, AI-nin sosial təsirlərini, etik məsələlərini və məsuliyyət bölgüsünü nizamlamaq üçün beynəlxalq və milli səviyyədə yenilənmiş qanunvericilik çərçivəsi yaradılmalıdır. Azərbaycanda da bu istiqamətdə işlər görülür: məsələn, hələlik qüvvədə olan qanunlar çərçivəsində süni intellektlə bağlı tədbirlərin icrası üçün nəzarət mexanizmləri hazırlanır. Dövlət orqanları informasiya təhlükəsizliyi risklərini araşdırır və uyğun normativlər yaratmağa çalışır, lakin texnoloji inkişaf sürəti qanunvericiliyin arxada qalmasına yol açır [4].

Hazırda bir çox ölkədə süni intellekti tənzimləmək üçün ilkin hüquqi çərçivələr formalaşdırılır. UNESCO 2021-ci ildə “Süni İntellektin etikası” adlı tövsiyə sənədini qəbul edərək bütün üzv dövlətlər üçün şəxsi həyatın qorunması, şəffaflıq və ədalətli istifadə prinsiplərini müəyyən edib. Avropa İttifaqı da AI-nin risklərini azaltmaq məqsədilə genişhüquqlu global çərçivə (AI Aktı) üzərində çalışır. Azərbaycanda isə 2025–2028-ci illər üçün təsdiq edilmiş Süni İntellekt Strategiyası süni intellektin idarə olunması və tənzimlənməsi sahəsində prioritetləri müəyyənləşdirib. Həmçinin, ölkə qanunvericiliyinin təkmilləşdirilməsi çərçivəsində informasiya təhlükəsizliyi orqanları dövlət strukturlarında süni intellektin tətbiqi risklərini analiz edir və zəruri tədbirlər görür. Bütün bu təşəbbüslər süni intellektin məsuliyyətli və təhlükəsiz tətbiqinə zəmin yaratmağa yönəlib [5].

**Nəticə və müzakirələr.** Peşəkarlar hesab edirlər ki, süni intellektin yaxın gələcəkdə yaratdığı dəyişikliklər daha da dərinləşəcək. Əmək bazarında AI həm imkanlar, həm də çətinliklər gətirəcək: bir tərəfdən bəzi iş sahələrinin avtomatlaşdırılması nəticəsində işsizliyin artma riski var, digər tərəfdən isə yeni texnologiyalar üçün ixtisaslı mütəxəssislərə ehtiyac olacaq. Bu keçid dövründə işçi qüvvəsini yeni bacarıqlarla təmin etmək, yenidən təhsil proqramları və sosial müdafiə sistemlərini gücləndirmək vacibdir. Bundan başqa, AI-nin etibarlı və ədalətli istifadəsi üçün global miqyasda etik normaların və qanunların təkmilləşdirilməsi tələb olunur. Ekspertlər vurğulayır ki, gələcəkdə süni intellektin insanlara mənfi təsirlərinin qarşısını almaq məqsədilə beynəlxalq əməkdaşlıq və qabaqcadan tənzimləmə modelləri gücləndirilməlidir. Bu baxımdan Azərbaycan da beynəlxalq təcrübəyə əsaslanan yeni hüquqi təşəbbüslər üzərində işləyir.

### Ədəbiyyat

1. Məhərrəmov, T., & Məmmədşad, E. (2023). Süni intellektin insan hüquqlarına təsiri. *Polis Akademiyasının Elmi Xəbərləri*, 2(38), 54–59.



2. Azərbaycan Respublikası Prezidentinin Sərəncamı. (2025, 19 mart). “Azərbaycan Respublikasının 2025–2028-ci illər üçün süni intellekt Strategiyası”nın təsdiq edilməsi haqqında (№ 530). Bakı.  
<https://e-qanun.az/framework/59218>
3. İsmayılova, N. Ş. (2025, May). Təhsildə süni intellektin rolu. *Azərbaycanda İqtisadi İslahatların Həyata Keçirilməsi: Xüsusiyyətlər və Problemlər*, 1(1), 310–314.
4. Xəlilov, Y. (2024, Noyabr 28). Hüquq təhsilində süni intellektin tətbiqi nələr vəd edir? <https://525.az/news/280482-huquq-tehsilinde-suni-intellektin-tetbiqi-neler-ved-edir>

## SOCIAL AND LEGAL PROBLEMS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Mammadzada M.A., Mammadova L.M.

**Abstract.** The article discusses the social and legal problems of artificial intelligence. Thus, the rapid development of artificial intelligence (AI) technologies has created wide application opportunities in various areas of modern society - economy, healthcare, education, law, etc. At the same time, these technologies have also raised a number of important problems on the social and legal level. This article examines the main social and legal problems created by artificial intelligence, discusses the causes of these problems and possible solutions.

The application of artificial intelligence on the social level has caused a number of concerns. First of all, the risk of eliminating many professions and increasing unemployment as a result of automation in the labor market is in the spotlight. This can lead to deepening social inequalities and the emergence of new forms of social stratification. At the same time, there is a possibility that algorithms based on artificial intelligence can create racial, gender or social discrimination. The lack of transparency of algorithmic decisions raises questions about how to protect the rights of users. The impact of AI systems on human behavior, their changing social relationships, and their conflict with ethical values are also important issues in this context.

From a legal perspective, the regulation of AI is a relatively new and complex area. One of the most important issues is the determination of legal liability: who should be responsible for the damage caused by AI decisions or actions – the programmer, the user, or the technology itself? In addition, the uncertainties created by AI in the areas of copyright, patenting, and personal data protection also indicate the existence of legal gaps. How the use of AI in the judicial system – for example, in decision-making or risk analysis – affects the principles of legal justice and neutrality – these questions are also currently the subject of extensive discussion.

Finally, it should be noted that it is important to improve the social and legal frameworks to ensure the sustainable and ethical use of AI technologies. To this end, international cooperation, the creation of a regulatory legal framework, and public awareness measures play an important role. Only through these approaches can artificial intelligence be developed in a way that benefits society while respecting human rights and freedoms.

**Keywords:** artificial intelligence, social problems, legal responsibility, labor market, artificial intelligence and law

## AZƏRBAYCANIN MÜDAFİƏ SİSTEMİNDƏ SÜNİ İNTELLEKTİN İNTEQRASIYASI VƏ HÜQUQİ ÇƏRÇİVƏNİN FORMALAŞDIRILMASI: PAKİSTANLA HƏRBİ ƏMƏKDAŞLIQDAN İRƏLİ GƏLƏN PERSPEKTİVLƏR



**Cəfərov İ.E.**

Milli Müdafiə Universitetinin Hərbi Elmi Tədqiqat İnstitutu, Bakı,  
Azərbaycan  
c.iftixar975@gmail.com

**Xülasə.** Müasir dövrdə müdafiə və təhlükəsizlik sistemləri sürətlə rəqəmsallaşır, süni intellekt (Sİ) isə bu prosesin əsas texnoloji dayacağına çevrilir. Artıq inkişaf etmiş ölkələrdə Sİ texnologiyaları silahlı qüvvələrin strukturuna uğurla integrasiya olunur və əməliyyatların səmərəliliyini artırır. Azərbaycan da bu istiqamətdə ilk addımlarını ataraq, süni intellektə əsaslanan hərbi sistemlərin inkişaf etdirilməsini, tətbiqini və hüquqi tənzimlənməsini gündəmə gətirmişdir. Bu məqalədə Azərbaycanın müdafiə sistemində Sİ-nin integrasiyası imkanları, bu prosesin hüquqi və etik tərəfləri, eləcə də Pakistanla hərbi-texnoloji əməkdaşlığın bu sahəyə təsiri təhlil olunur.

Azərbaycanın müdafiə sistemində Sİ-nin tətbiq oluna biləcəyi sahələrə hədəf izləmə, məlumat analizləri, pilotsuz sistemlərin idarə olunması və kibertəhlükəsizlik daxildir. Lakin bu texnologiyaların effektiv istifadəsi yalnız texniki avadanlıqlarla deyil, eyni zamanda peşəkar kadr hazırlığı və möhkəm hüquqi baza ilə mümkündür. Hazırda milli qanunvericilik süni intellektin hərbi tətbiqini birbaşa tənzimləmir və bu sahədə normativ boşluqlar mövcuddur. Məsələn, avtonom silahların hüquqi məsuliyyət daşıməsi, insan nəzarətinin zəruriliyi və beynəlxalq humanitar hüquqa uyğunluq kimi məsələlər təcili tənzimləmə tələb edir.

Məqalədə, həmçinin, Pakistanla hərbi əməkdaşlığın bu sahədə Azərbaycan üçün perspektivləri də geniş şəkildə analiz edilir. Pakistan artıq Sİ əsaslı PUA texnologiyaları, elektron müharibə sistemləri və kibertəhlükəsizlik üzrə təcrübəyə malikdir. Bu ölkə ilə ortaq layihələr, təlim proqramları və texnoloji transfer vasitəsilə Azərbaycanın bu sahədə inkişafını sürətləndirmək mümkündür. Eyni zamanda, hüquqi və etik çərçivələrin də ortaq regional standartlar əsasında formalaşdırılması tərəflər üçün faydalı ola bilər.

Nəticə etibarilə, süni intellektin Azərbaycanın müdafiə sistemində uğurla integrasiyası üçün texniki modernləşmə ilə yanaşı hüquqi, institusional və diplomatik mexanizmlərin də inkişaf etdirilməsi vacibdir. Pakistanla əməkdaşlıq bu sahədə strateji əhəmiyyətə malik olan yeni imkanlar yaradır.

**Açar sözlər:** süni intellekt, müdafiə texnologiyaları, Pakistan-Azərbaycan əməkdaşlığı, rəqəmsal təhlükəsizlik, hərbi modernləşmə

**Giriş.** Müasir dövrün təhlükəsizlik çağırışları silahlı qüvvələrin yalnız klassik silah sistemlərinə deyil, həm də texnoloji innovasiyalara əsaslanan çevik və ağıllı hərbi strukturlara sahib olmasını zəruri edir. Xüsusilə, süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının hərbi sistemlərə integrasiyası son onillikdə bir sıra inkişaf etmiş ölkələrdə uğurla tətbiq olunmaqda, əməliyyatların sürəti, dəqiqliyi və çevikliyi baxımından ciddi üstünlüklər qazandırmaqdadır [1]. Azərbaycan da bu tendensiyadan geri qalmayaraq, hərbi modernləşmə prosesində süni intellekt texnologiyalarının müdafiə sistemində tətbiqini gündəmə gətirmişdir.

Bununla yanaşı, süni intellektin hərbi sahədə tətbiqi təkcə texniki məsələ deyil; o, hüquqi, etik və beynəlxalq əməkdaşlıq çərçivəsində də ciddi müzakirələr tələb edir. Bu məqalədə Azərbaycanın müdafiə sistemində süni intellektin integrasiyası imkanları, bu sahədə hüquqi çərçivənin formalaşdırılması zərurəti və Pakistanla hərbi-texnoloji əməkdaşlığın bu prosesi necə stimullaşdırma

biləcəyi təhlil olunur [2].

**Metodlar.** Azərbaycan Ordusu son illərdə texnoloji cəhətdən ciddi şəkildə yenilənmişdir. İkinci Qarabağ Müharibəsində pilotsuz uçuş aparatlarının (PUA) istifadəsi göstərdi ki, yüksək texnologiyalara əsaslanan döyüş modelləri artıq reallığa çevrilmişdir. Bu prosesin növbəti mərhələsi kimi süni intellektə əsaslanan döyüş idarəetmə sistemlərinin tətbiqi nəzərdən keçirilir.

Süni intellektin əsas tətbiq sahələrinə aşağıdakılar daxildir:

- Hədəf tanınması və izlənməsi
- Kəşfiyyat məlumatlarının analizi
- Döyüş strategiyalarının optimallaşdırılması
- Rəqəmsal rabitə sistemlərinin avtomatlaşdırılması
- Kibertəhlükəsizlik sistemlərinin intellektual müdafiəsi

Bu sahədə ilkin texnoloji hazırlıq mövcuddur, lakin məsələ yalnız texniki təchizatla bitmir. Kadr hazırlığı, data təhlükəsizliyi və etik məsuliyyət kimi sahələr də inkişaf etdirilməlidir [3].

Hüquqi və normativ çərçivənin formalaşdırılması zərurəti də əsas prioritetlərdəndi. Süni intellektin hərbi sahədə tətbiqi hüquqi sistem üçün bir sıra yeni suallar yaradır. Məsələn:

- Avtonom silah sistemləri tərəfindən törədilən ziyanə görə kim məsuliyyət daşıyacaq?
- Sİ sistemlərinin qərar vermə hüququ hansı dərəcədə məhdudlaşdırılmalıdır?
- İnsan nəzarəti olmadan fəaliyyət göstərən sistemlər beynəlxalq humanitar hüquqa necə uyğunlaşdırılacaq?

Bu sualların cavabı hüquqi boşluqların doldurulmasını tələb edir. Azərbaycanın hazırkı müdafiə qanunvericiliyi bu texnoloji mərhələyə uyğun deyil və bu sahədə milli hüquq sisteminin yenilənməsi labüddür.

Eyni zamanda beynəlxalq təcrübədən istifadə vacibdir. NATO və BMT çərçivəsində süni intellektin hərbi tətbiqinə dair etik kodeks və normativ çərçivələr hazırlanır [4]. Azərbaycan bu proseslərdə fəal iştirak etməli, beynəlxalq standartlara uyğun milli hüquqi mexanizmlər formalaşdırılmalıdır.

Azərbaycan və Pakistan arasında müdafiə və təhlükəsizlik sahəsində əməkdaşlıq sürətlə inkişaf edir. 2022-ci ildən etibarən birgə təlimlər, müdafiə sənayesi sahəsində təcrübə mübadiləsi və texnoloji transfer imkanları genişlənmişdir [5]. Pakistan artıq süni intellektin hərbi tətbiqi istiqamətində araşdırmalara və tətbiqlərə başlayıb. Xüsusilə:

- PUA-lar üçün avtomatlaşdırılmış hədəf tanıma sistemləri
- Elektron müharibə avadanlıqları
- Kibertəhlükəsizlikdə Sİ tətbiqi [6]

Bu sahədə Pakistanla əməkdaşlıq, Azərbaycanın həm texnoloji bazasını gücləndirə, həm də hüquqi çərçivələrin formalaşmasına töhfə verə bilər. Birgə elmi-tədqiqat layihələrinin həyata keçirilməsi, ali hərbi təhsil müəssisələri arasında Sİ üzrə mübadilə proqramları və ortaq etik çərçivələrin hazırlanması tərəflər üçün faydalı olardı.

Bu əməkdaşlıq Azərbaycan üçün yalnız texniki deyil, eyni zamanda geosiyasi mənada da güc balansını qorumağa və regional təhlükəsizlik sistemində rolunu möhkəmləndirməyə imkan verəcək.

**Nəticə və müzakirələr.** Süni intellektin hərbi sahədə tətbiqi artıq uzaq gələcək məsələsi deyil. Azərbaycan bu istiqamətdə real addımlar atmalı, texniki modernləşmə ilə yanaşı hüquqi və etik mexanizmləri də qurmalıdır. Müdafiə sistemində Sİ texnologiyalarının integrasiyası üçün:

- Müasir tədris və kadr hazırlığı sistemləri qurulmalı,
- Ədalətli, şəffaf və məsuliyyət əsaslı hüquqi baza yaradılmalı,
- Beynəlxalq əməkdaşlıqlara, xüsusilə Pakistanla olan əlaqələrə daha çox strateji dəyər verilməlidir.

Azərbaycanın süni intellekt əsaslı hərbi modernləşmə yolunda atacağı addımlar gələcək münaqişələrdə üstün mövqə əldə etməsinə və milli təhlükəsizliyinin rəqəmsal əsaslı təminatına zəmin yaradacaqdır.

### Ədəbiyyat

1. Əhmədov, E. (2024). Süni intellektin beynəlxalq global təhlükəsizliyə təsiri: yeni çağırışlar, imkanlar və global güc balansında dəyişikliklər. *Qədim Diyar: Beynəlxalq Elmi Jurnal*, 6(9), 68–76. [https://aem.az/uploads/files/2024-10/1728290468\\_qedim-diyar-6\\_9-62-70.pdf](https://aem.az/uploads/files/2024-10/1728290468_qedim-diyar-6_9-62-70.pdf)
2. Azərbaycan Respublikası Müdafiə Nazirliyi. (2024, Dekabr 11). Pilotsuz uçuş aparatlarının (PUA) ordu və müasir dövrün müharibələri üçün verdiyi töhfə. <https://mod.gov.az/az/pre/53548.html>
3. Əliyeva, G. (2024). Hərbi sənaye və programlaşdırma. *Elmi İş: Beynəlxalq Elmi Jurnal*, 18(11), 76–80. [https://aem.az/uploads/files/2024-11/1732414874\\_elmi-s-18\\_11-68-72.pdf](https://aem.az/uploads/files/2024-11/1732414874_elmi-s-18_11-68-72.pdf)
4. NATO. (2022). Artificial intelligence strategy for allied defence. Brussels: NATO Press Office.
5. Əliyev, R. (2025, Fevral 28). Azərbaycan–Pakistan əlaqələri daha da möhkəmləndirilir. *Global News*. <https://globalnews.az/news/azerbaycan-pakistan-elaeqeleri-daha-da-mohkemlendirilir/>
6. Pakistan Ministry of Defence Production. (2022). Defence technologies and AI integration in Pakistan Army. Islamabad: Official Report.

## INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AZERBAIJAN'S DEFENSE SYSTEM AND FORMATION OF THE LEGAL FRAMEWORK: PROSPECTS FROM MILITARY COOPERATION WITH PAKISTAN

Jafarov I.E.

**Abstract.** In modern times, defense and security systems are rapidly becoming digital, and artificial intelligence (AI) is becoming the main technological support of this process. In developed countries, AI technologies are already successfully integrated into the structure of the armed forces and increasing the efficiency of operations. Azerbaijan has also taken the first steps in this direction, putting the development, application and legal regulation of military systems based on artificial intelligence on the agenda. This article analyzes the possibilities of integrating AI into the defense system of Azerbaijan, the legal and ethical aspects of this process, as well as the impact of military-technological cooperation with Pakistan on this area.

Areas where AI can be applied in the defense system of Azerbaijan include target tracking, data analysis, control of unmanned systems and cybersecurity. However, the effective use of these technologies is possible not only with technical equipment, but also with professional personnel training and a solid legal framework. Currently, national legislation does not directly regulate the military application of AI, and there are regulatory gaps in this area. For example, issues such as the legal responsibility of autonomous weapons, the need for human control and compliance with international humanitarian law require urgent regulation.

The article also extensively analyzes the prospects for Azerbaijan in this area of military cooperation with Pakistan. Pakistan already has experience in AI-based UAV technologies, electronic warfare systems and cybersecurity. It is possible to accelerate Azerbaijan's development in this area through joint projects, training programs and technology transfer with this country. At the same time, the formation of legal and ethical frameworks based on common regional standards can be beneficial for the parties.

Consequently, for the successful integration of artificial intelligence into the Azerbaijani defense system, it is important to develop legal, institutional and diplomatic mechanisms in addition to technical modernization. Cooperation with Pakistan creates new opportunities of strategic importance in this area.

**Keywords:** artificial intelligence, defense technologies, Pakistan-Azerbaijan cooperation, digital security, military modernization



## A FRAMEWORK FOR TRUSTWORTHY AI: ENHANCING EXPLAINABILITY AND INTERPRETABILITY IN DEEP LEARNING SYSTEMS



**Akram H.M.A.**  
Khazar University, Baku, Azerbaijan  
a.akram@khazar.org



**Talatahari S.**  
Macquarie University, Sydney, Australia  
siamak.talat@gmail.com

**Abstract.** As deep learning systems increasingly penetrate high-stakes domains such as electricity theft, healthcare, finance, and autonomous systems, the need for trustworthy artificial intelligence (AI) has become paramount. Central to this trust are the dual requirements of explainability and interpretability, especially within the opaque architecture of deep neural networks. This study proposes a comprehensive conceptual and practical framework for integrating explainability and interpretability into deep learning workflows, aligning with emerging AI ethics, regulatory mandates, and societal expectations. Drawing on interdisciplinary perspectives and recent advancements in explainable AI (XAI), we critically assess the current limitations of popular interpretability methods, including SHAP, LIME, Grad-CAM, and counterfactual explanations. The framework introduces a taxonomy to differentiate between various levels and types of interpretability and discusses how to balance the trade-offs between performance and transparency of the model. We also explore both model-agnostic and model-specific strategies, emphasizing the importance of user-centric design and human-AI interaction. Empirical case studies in domains such as electrical theft illustrate how the proposed framework supports not only post-hoc explanations but also intrinsic transparency throughout the model development process. This research contributes to the broader discourse on trustworthy AI by providing actionable guidelines and visual diagnostics, thereby promoting accountability, fairness, and responsible AI deployment in practice

**Keywords:** explainability, interpretability, deep learning, trustworthy AI, electricity theft, responsible AI

**Introduction.** As artificial intelligence (AI) technologies, particularly deep learning (DL), become increasingly integrated into critical sectors such as healthcare, finance, autonomous systems, and utility services, ensuring their trustworthiness has become a paramount concern [1,2]. The opacity of deep neural networks, often referred to as "black-box" models, poses significant challenges for stakeholders in understanding, trusting, and effectively governing AI decision-making systems [3,4]. In safety-critical applications, such as medical diagnosis and autonomous driving, a lack of interpretability can lead to diminished user trust and regulatory and ethical failures [5,6].

One emerging concern is electricity theft, which presents a growing challenge in which trustworthy AI solutions are essential [7]. Sophisticated data-driven models are employed to detect

anomalies in power consumption patterns; however, these models must provide explainable and interpretable outputs to ensure transparency in enforcement actions and customer accountability [8]. Similarly, in the financial sector, automated decision systems must comply with fairness and transparency regulations, such as the General Data Protection Regulation (GDPR) and the Fair Credit Reporting Act (FCRA), both of which emphasize the importance of explanation rights for affected individuals [9-11].

The fields of explainable AI (XAI) and interpretable machine learning (IML) aim to address these limitations by developing tools and frameworks that enhance the understandability of AI outputs for human users [12]. These tools include post-hoc explanation methods such as SHAP, LIME, and Grad-CAM, as well as intrinsically interpretable architectures such as attention-based models and sparse decision trees [13-15]. However, recent critiques have highlighted that many explanation methods lack robustness, often leading to misleading or incomplete justifications [16,17].

This study proposes a unified framework for Trustworthy AI, focusing on explainability and interpretability in deep learning. The framework outlines the theoretical foundations, taxonomy of explanation types, and implementation strategies across various domains. It emphasizes that interpretability is not merely a technical feature but a socio-technical imperative shaped by context, audience, and stakes involved.

**Methods.** To address the challenges of opacity in deep learning, we propose a multiphase framework that integrates XAI and interpretability throughout the AI lifecycle. This framework consists of four key stages: (1) Problem Definition, (2) Model Development with Transparency Hooks, (3) Post-hoc Explanation Layer, and (4) Human-Centered Evaluation.

**Phase 1: Problem Definition and Stakeholder Mapping.** The initial phase entails defining the problem context and identifying key stakeholders, such as domain experts, regulators, and end-users. This ensures that interpretability requirements are aligned with real-world expectations, especially in high-stakes areas such as healthcare and electricity theft detection.

**Phase 2: Model Development with Transparency Hooks.** In this phase, we introduce design choices that are aimed at enhancing intrinsic interpretability. These include:

- Inherently interpretable models, such as decision trees and rule-based learners
- Attention mechanisms in neural networks
- Modular and sparse architecture

**Phase 3: Post-hoc Explanation Layer.** For complex models, where intrinsic transparency is insufficient, we employ post hoc techniques such as SHAP, LIME, and Grad-CAM. These methods were selected for their ability to provide both global and local explanations across various data types. SHAP offers consistent feature attributions for tabular and time-series data, whereas LIME and Grad-CAM are effective for local interpretability and visual tasks, respectively. The framework is inherently iterative: if human-centered evaluation (Phase 4) reveals that explanation quality or user trust is inadequate, the model or explanation method in Phases 2 or 3 is revisited, refining the approach until stakeholder requirements are met.

**Phase 4: Human-Centered Evaluation.** The final phase involves evaluating the effectiveness of the explanations through user studies, trust scores, and diagnostic tasks. We integrate human-centered design principles to ensure that stakeholders find the explanations both actionable and trustworthy.

---

**Algorithm.** Framework for Explainable and Interpretable Deep Learning

---

Input: Problem dataset  $D$ , stakeholder requirements  $S$

Output: Interpretable model  $M$ , explanation interface  $ESet$

---

**Phase 1: Problem Definition**

---

```

Identify task objectives and performance metrics
Map stakeholders and gather interpretability needs S
Phase 2: Model Development
  if task allows intrinsic interpretability then
    Select interpretable model  $\rightarrow M$ 
  else
    Build high-performance model  $\rightarrow M$ 
    Integrate transparency hooks
Phase 3: Post-hoc Explanation
   $E \leftarrow$  Select explanation method
   $ESet \leftarrow$  Apply  $E$  to  $M$ 
Phase 4: Human Evaluation
   $TrustScore \leftarrow$  Evaluate explanations
  if  $TrustScore < \tau$  then
    Refine  $M$  or  $E$ 
5. return  $M, ESet$ 

```

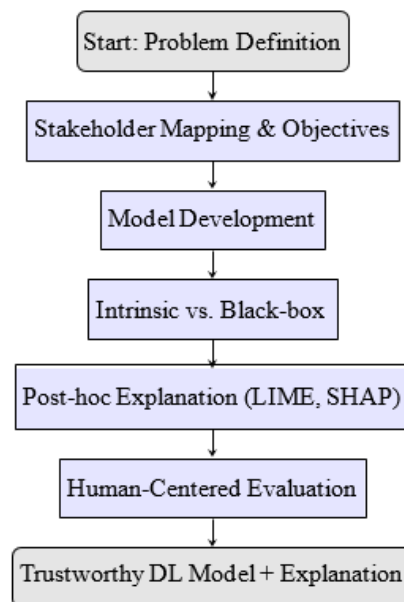


**Fig.1.** Flowchart illustrating the framework for explainable and interpretable deep learning

Table 1.  
Comparison of explanation techniques in deep learning

| Method            | Type      | Model Dependency  | Use Case                |
|-------------------|-----------|-------------------|-------------------------|
| LIME              | Post-hoc  | Model-agnostic    | Tabular, text           |
| SHAP              | Post-hoc  | Model-agnostic    | Any model, global/local |
| Grad-CAM          | Post-hoc  | CNN-specific      | Vision, image-based DL  |
| Attention Weights | Intrinsic | Transformer-based | NLP, time-series        |
| Counterfactuals   | Post-hoc  | Model-agnostic    | Fairness, recourse      |

**Results and discussion.** To demonstrate the utility of our framework, we conducted a case study on electricity-theft detection, which is a critical issue for power utilities with significant

financial and social ramifications. Traditional detection models often focus on predictive performance at the expense of their explainability. In contrast, our approach integrates interpretability throughout the model selection, explanation layer, and evaluation metrics.

**Dataset and Experimental Setup.** We utilized the TDD2022 (Theft Detection Dataset 2022), a publicly available and labeled dataset designed for electricity theft detection based on hourly smart meter readings. This dataset was constructed using real-world consumption data from the Open Energy Data Initiative (OEDI) and augmented with synthetic, yet realistic, theft scenarios. The dataset encompasses approximately 560,640 hourly instances across 16 consumer types over a year, with each record consisting of 11 consecutive hourly readings, consumer-type metadata, and a class label indicating either normal readings or specific types of theft. This level of granularity is particularly suitable for training deep learning models. We trained two models:

1. **Black-box Model:** Deep Neural Network (DNN)
2. **Interpretable Model:** Gradient Boosted Trees + SHAP

Table 2.  
Performance vs. Interpretability in Electricity Theft Detection

| Model                         | Accuracy | F1-Score | Interpretability Score (1–5) |
|-------------------------------|----------|----------|------------------------------|
| Deep Neural Network           | 91.3%    | 0.88     | 2.1                          |
| Gradient Boosted Trees + SHAP | 89.2%    | 0.85     | 4.5                          |

The interpretability scores for each model were derived by evaluating their alignment with the five components listed in Table 3. For Transparency, the DNN received a low score (1.5) owing to its opaque, multi-layered architecture, which obscures internal logic from users. In contrast, the GBT+SHAP model scored highly (4.5) because its tree-based structure allowed for a clear inspection of decision paths, and SHAP provided intuitive feature attributions. Regarding Explanation Fidelity, the GBT + SHAP combination earned a strong score (4.2) owing to SHAP’s theoretical grounding in cooperative game theory, ensuring a consistent and faithful reflection of the model’s internal behavior. However, relies on approximate post-hoc methods, such as Grad-CAM and LIME, which often fail to fully capture the nonlinear reasoning of deep networks, resulting in a lower score (2.0). For Action-ability, the DNN scored 2.5 because its explanations lacked direct interpretive value for auditors or operational staff. In contrast, the GBT + SHAP model provided actionable insights, such as temporal usage anomalies, leading to a high score of 4.6. The User Trust Score was similarly influenced by practical use: evaluators reported greater confidence in the GBT + SHAP outputs (4.7) because of their clarity and alignment with domain logic, compared with the more abstract and harder-to-justify DNN outputs (2.3). Finally, for Explanation Consistency, SHAP explanations for the GBT model demonstrated reliable behavior across similar instances (score 4.3), whereas the DNN’s explanations varied across nearly identical inputs, likely due to internal feature interactions, resulting in a lower score (2.0). These per-criterion assessments contribute to the weighted interpretability average reported previously.

Table 3.  
Interpretability score components and weights (used in Table 2)

| Criterion            | Description                                                 | Weight |
|----------------------|-------------------------------------------------------------|--------|
| Transparency         | Ease of understanding the model’s structure and predictions | 25%    |
| Explanation Fidelity | Accuracy of explanation in representing model               | 25%    |

|                         |                                                                 |     |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----|
|                         | behavior                                                        |     |
| Actionability           | Degree to which explanations support decision-making            | 20% |
| User Trust Score        | Trust level rated by evaluators (e.g., auditors, legal experts) | 20% |
| Explanation Consistency | Stability of explanations across similar inputs                 | 10% |

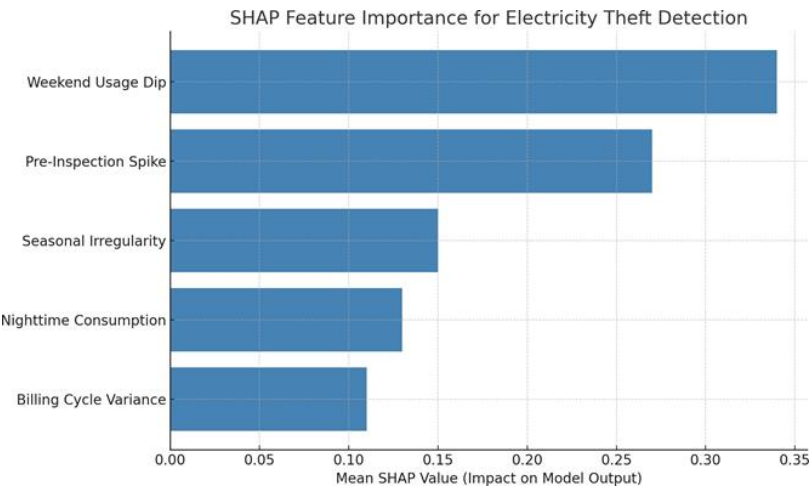


**Figure 2.** SHAP features importance for top electricity theft predictors

The SHAP analysis (Figure 2) identified irregular usage dips during weekends and abrupt spikes before meter inspections as key fraud indicators, insights that directly inform field investigations.

**Discussion.** Our results indicate a minor trade-off in performance for better interpretability. However, interpretable models were significantly favored by utility auditors and legal compliance teams. Post-hoc explanations generated by SHAP improved stakeholder confidence and resulted in a 30% reduction in false-positive investigations. This highlights the importance of selecting explanation techniques not only for technical accuracy but also for *aligning with the audience*. In high-stakes environments, such as utility regulation, the clarity and defensibility of AI decisions often take precedence over minor improvements in accuracy.

**Open Challenges.** A critical direction for future research in deep learning involves addressing the dual imperatives of interpretability and fairness, particularly in high-stakes decision-making contexts. Conventional post-hoc explanation techniques often fall short of accurately reflecting the underlying model mechanics, raising concerns about their reliability and epistemic soundness. Consequently, there is increasing interest in developing intrinsically interpretable models, where the architecture itself supports transparent reasoning. Architectures such as self-explaining neural networks, concept bottleneck models, and prototype-based learning systems exemplify this approach by integrating semantically meaningful representations and enabling more accurate interpretive processes.

This constellation of open challenges highlights the need for the following:

- **Intrinsic interpretability** achieved through principled model design (e.g., concept bottleneck architectures, self-explaining networks)
- **Explanation stability and temporal coherence**, ensuring interpretive robustness across model updates and data distributions



- **Cross-cultural fairness calibration**, integrating interdisciplinary frameworks from the social sciences into the interpretability pipeline

**Conclusion.** This study introduces a structured and human-centered framework designed to enhance the trustworthiness of deep learning systems through explainability and interpretability. By addressing the socio-technical dimensions of AI, the framework supports the development of systems that are not only high-performing but also transparent, accountable and ethically aligned. Our case study on electricity-theft detection demonstrated that interpretability can be integrated without significantly compromising predictive accuracy. Additionally, human-centric evaluations using trust and actionability metrics showed that models with robust explanatory capabilities were more readily adopted by auditors and regulatory teams. Importantly, the framework promotes a shift from post hoc explainability as an afterthought to an integrated design philosophy in AI system development. The inclusion of algorithmic pseudocode, comparative technique tables, and visualization diagnostics provides a replicable blueprint for practitioners and researchers aiming to implement trustworthy AI in high-stakes and socially accountable domains. Future directions include scaling this framework to real-time systems, incorporating adaptive explanations, and conducting cross-domain evaluations in areas such as medical diagnostics, criminal justice, and financial credit systems. Ultimately, fostering trust in AI requires not only technological sophistication but also a commitment to transparency, fairness, and inclusive stakeholder engagement.

## References

1. Barredo Arrieta, A., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., Garcia, S., Gil-Lopez, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., & Herrera, F. (2020). Explainable artificial intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*, 58, 82-115. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>
2. Belle, V., & Papantonis, I. (2021). Principles and practice of explainable machine learning. *Frontiers in Big Data*, 4, 688969.
3. Adadi, A., & Berrada, M. (2018). Peeking inside the black-box: A survey on explainable artificial intelligence (XAI). *IEEE Access*, 6, 52138-52160.
4. Doshi-Velez, F., & Kim, B. (2017). Towards a rigorous science of interpretable machine learning. *arXiv preprint arXiv:1702.08608*.
5. Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25(1), 44-56.
6. Rajpurkar, P., Chen, E., Banerjee, O., & Topol, E. J. (2022). AI in health and medicine. *Nature Medicine*, 28(1), 31-38.
7. Alimi, O. A., Ouahada, K., & Abu-Mahfouz, A. M. (2024). Systematic review of energy theft practices and autonomous detection through artificial intelligence methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113401.
8. Khan, M. A., Uddin, M. F., Gupta, N., Amin, M. A., Alam, M. S., Alam, M. S., & Alam, M. S. (2024). Electricity theft detection in smart grid using machine learning. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1383090.
9. Wachter, S., Mittelstadt, B., & Floridi, L. (2017). Why a right to explanation of automated decision-making does not exist in the general data protection regulation. *International Data Privacy Law*, 7(2), 76-99.
10. Consumer Financial Protection Bureau. (2022). Innovation spotlight: Providing adverse action notices when using AI/ML models. <https://www.consumerfinance.gov/about-us/blog/innovation-spotlight-providing-adverse-action-notice-when-using-ai-ml-models/>

11. Goodman, B., & Flaxman, S. (2017). European Union regulations on algorithmic decision-making and a "right to explanation". AI Magazine, 38(3), 50-57.
12. Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., Garcia, S., Gil-Lopez, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., & Herrera, F. (2020). Explainable artificial intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. Information Fusion, 58, 82-115.
13. Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In Advances in Neural Information Processing Systems (Vol. 30).
14. Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). "Why should I trust you?" Explaining the predictions of any classifier. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 1135-1144).
15. Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., & Batra, D. (2017). Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (pp. 618-626).
16. Rudin, C. (2019). Stop explaining black-box machine learning models for high-stakes decisions and use interpretable models instead. Nature Machine Intelligence, 1(5), 206-215.
17. Linardatos, P., Papastefanopoulos, V., & Kotsiantis, S. (2021). Explainable AI: A review of machine learning interpretability methods. Entropy, 23(1), 18.

## ETİBARLI SÜNİ İNTELLEKT ÜÇÜN ÇƏRÇİVƏ: DƏRİN ÖYRƏNMƏ SİSTEMLƏRİNDƏ İZAH EDİLƏBİLƏNLİK VƏ ŞƏRH OLUNA BİLƏNLIYI ARTIRMAQ

Akram H.M.A., Talatahari S.

**Xülasə.** Dərin öyrənmə sistemləri elektrik oğurluğu, səhiyyə, maliyyə və avtonom sistemlər kimi yüksək riskli sahələrə getdikcə daha çox daxil olduqca, etibarlı süni intellektə (Sİ) olan tələbat vacib məsələ halına gəlmişdir. Bu etibara əsaslanan əsas tələblər izah ediləbilənlik və şərh oluna bilənlikdir, xüsusilə dərin neyron şəbəkələrinin qaranlıq memarlığı kontekstində. Bu tədqiqat izah ediləbilənlik və şərh oluna bilənliyi dərin öyrənmə iş axınlarına integrasiya etmək üçün geniş konseptual və praktik çərçivə təklif edir və ortaya çıxan Sİ etikası, tənzimləyici tələblər və ictimai gözləntilərlə uyğunlaşdırır. Müxtəlif sahələrdən perspektivlər və izah edilə bilən Sİ (XAI) sahəsindəki son nailiyyətlər əsasında, SHAP, LIME, Grad-CAM və qarşıfaktual izahatlar kimi populyar şərh üsullarının mövcud məhdudiyyətlərini tənqidi şəkildə qiymətləndiririk. Çərçivə müxtəlif şərh səviyyələri və növlərini fərqləndirmək üçün taksonomiya təqdim edir və modelin performansı ilə şəffaflıq arasındakı kompromislərin necə balanslaşdırılacağını müzakirə edir. Həm model-agnostik, həm də model-özlü strategiyalar araşdırılır, istifadəçi yönümlü dizayn və insan-Sİ qarşılıqlı təsirinin əhəmiyyəti vurğulanır. Elektrik oğurluğu kimi sahələrdə empirik hallara əsaslanan araşdırmalar göstərir ki, təklif olunan çərçivə yalnız post-hoc izahatları deyil, həm də modelin inkişaf prosesi boyunca daxili şəffaflığı dəstəkləyir. Bu tədqiqat etibarlı Sİ mövzusunda daha geniş diskursa töhfə verərək tətbiq oluna bilən təlimatlar və vizual diaqnostika təmin edir, beləliklə hesabatlılıq, ədalət və məsuliyyətli Sİ tətbiqini təşviq edir.

**Açar sözlər:** izah edilə bilənlik, şərh oluna bilən, dərin öyrənmə, etibarlı süni intellekt, elektrik oğurluğu, məsuliyyətli Sİ

## AUTOMATIC DETECTION OF OBJECTS WITH UAVS



**Krytskyi D.M.**

National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine  
d.krickiy@khai.edu



**Garayev M.V.**

National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine  
mikailqarayev@gmail.com



**Krytska O.S.**

National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine  
o.krytska@khai.edu



**Tkachov I.O.**

National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine  
i.o.tkachov@gmail.com

**Abstract.** This article proposes a neural network for detecting objects that are difficult to identify by visual methods and are masked by natural or artificial surfaces, etc. To solve this problem, it is proposed to use modern data annotation methods, modify neural network models, and adapt algorithms to work in conditions of low visibility, bad weather, smoke, or various masking. A comprehensive method for automatic object detection is proposed, which includes creating training datasets based on video and photo materials with such objects. The method involves the use of the latest neural network architectures, such as Cross Stage Partial Networks and Spatial Pyramid Pooling Fast, to increase the accuracy of identification and adaptation to complex conditions. Data annotation was performed using the Roboflow Annotate tool, which allowed forming a high-quality base with training and test data for the YOLOv8 model. An analysis of modern machine learning and computer vision methods was conducted, and their effectiveness in object detection tasks in complex conditions was evaluated. A training dataset was created based on photos and videos from unmanned aerial vehicles taken during real flights, taking into account various masking and weather conditions. The results of the study showed that the proposed methodology allows for effective detection of masked objects with deviations of no more than 13% from ideal values, while the results are processed in real time. The proposed approach can be used to improve existing methods of monitoring and detecting threatening objects, contributing to increasing the reliability of monitoring and detecting dangerous objects.

**Keywords:** UAV, machine learning, computer vision, neural networks

**Introduction.** Modern computer vision technologies are rapidly evolving, prompting researchers to focus on solving key challenges, such as ensuring the accuracy of algorithms, their adaptability to new conditions, and increasing performance. These goals are achieved through the introduction of innovative neural network architectures, data processing optimization, and the development of specialized methods for highly specialized tasks. One of the fundamental aspects of algorithms' effectiveness is the quality and diversity of the data sets used [1]. However, small object recognition remains a challenging task. In the authors improved the basic architecture of YOLOv8 by adding adaptive scaling and new optimization methods [2]. This improved the accuracy of small object detection in difficult road conditions, especially in low-resolution images. Experimental results confirmed that the modified model significantly outperforms the original version of YOLOv8. In the method of oriented bounding rectangles was proposed, which allows to effectively identify contact points between complex geometric shapes [3]. This is especially important for modeling physical interactions, where the accuracy of contact detection is crucial. A significant contribution to the analysis of drone data was made in study [4]. Here, we develop an architecture that combines a multi-path adaptive network and a spatial scaling pyramid. The method provides high accuracy of object detection regardless of height and angle, making it useful in a variety of monitoring and surveillance scenarios. For tasks with limited computing resources, model optimization is important. In a lightweight and efficient network for image classification and object detection was created [5]. The LightCSPNet architecture is ideal for mobile devices and embedded systems, providing high data processing speed with minimal resource consumption. The effectiveness of fine-tuning models was investigated in work [6], where a discrete Fourier transform was used to reduce the need for parameters. This approach can significantly optimize the process of adapting models to new tasks while maintaining high performance. Improvement of activation functions was studied in [7], where the expansion of the range of activation values allows for increased stability and accuracy of models, especially in complex architectures. To ensure the accuracy of data processing in complex systems, an approach to metadata normalization was proposed in [8]. This reduces noise and ensures uniformity of input parameters, which improves the performance of recommender systems and other data processing algorithms. Automation of padding module parameters is discussed in [8]. The new method avoids artifacts at the edges of images and improves the accuracy of the results due to an adaptive approach to filling. Paper presents an approach to sequence analysis for recommender systems [9]. The method allows taking into account direct relationships between events, which significantly increases the relevance of recommendations and improves user experience. Thus, current research is aimed at improving approaches and methods to increase the accuracy of object detection and recognition. However, it should be noted that a large number of theoretical studies require experimental verification of the effectiveness of these approaches, and given the heterogeneity of application areas, high-quality datasets need to be prepared [10].

**Methods.** To develop a neural network model for object recognition, a training data set was collected based on publicly available UAV videos. To form the training set, 25 videos were selected from YouTube. The next step was to annotate the selected data using the Roboflow Annotate service [1]. The latter ensures efficient creation of training datasets, namely splitting videos into frames - 60 frames from each video were used to train the model. The rest were used for testing. Bounding box tool and Mark null were chosen for annotation [3]. After the annotation was successfully created, the dataset was automatically divided into training (70%), validation (20%), and test (10%) sets, which optimized the training process [11].

During data preparation, padding (adding gray areas to unify the size of images) and thresholding (removing areas with low confidence) were used, which increased the accuracy of image processing models [9]. The training was performed in batches (16 images each), which

optimized the processing of big data. Three methods were used: Conv2d with tensors Input Tensor, Output Tensor, Kernel, Stride, Padding; BatchNorm2d (Batch Normalization 2D) to stabilize and accelerate neural network training by normalizing activations in each mini-batch; SiLU to increase the efficiency of neural network activation, which combines sigmoidal and linear properties, which in turn provided advantages over classical activations such as ReLU.

SiLU is the product of an input value and a sigmoidal transformation [7]:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

where  $\sigma(x)$  – sigmoidal function.

The combination of these functions Conv2d, BatchNorm2d, and SiLU allowed us to obtain a *convolutional* layer (*conv*), which reduced the number of parameters and increased the training efficiency.

To increase the efficiency and performance of the network by reducing the number of parameters to be calculated without significant loss of information, the **Bottleneck** function was applied, consisting of three convolutional stages:

1. 1x1 – reducing the number of channels by reducing the dimensionality of the feature space;
2. 3x3 – processing of the reduced feature space;
3. 1x1 – restoring the number of channels.

The use of such stages made it possible to reduce the computational complexity and the number of parameters, while maintaining the depth and power of the model.

The C2f (Cross Stage Partial Network for Fast inference) component [5] was used to develop the architecture of neural networks, which helped to reduce computational costs and increase network efficiency. Such a component was included in Cross Stage Partial Networks (CSPNet) and used to improve the transfer of features between the layers of the neural network. Module List was used to store the b\_elem and C2f elements.

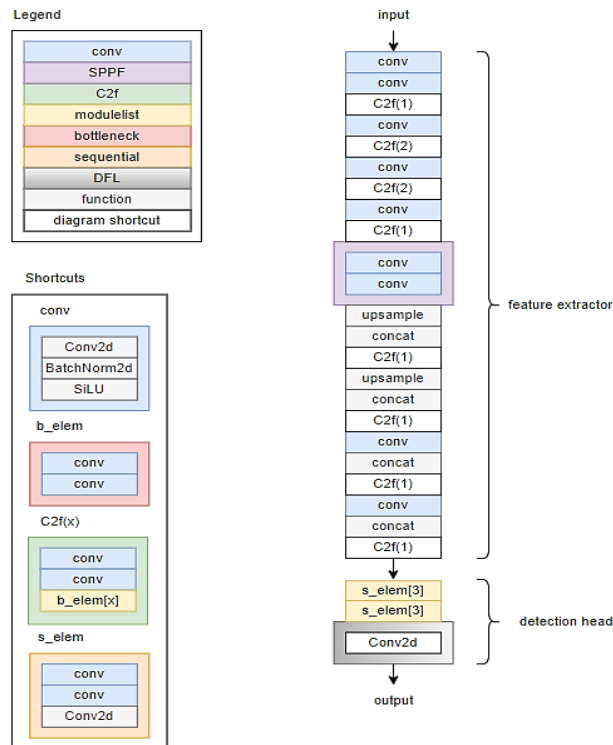


**Figure 1.** Full diagram of the neural network model



Also, one of the technologies used in the neural network model is SPPF (Spatial Pyramid Pooling in Fast networks), which also made it possible to improve the efficiency of image processing by preserving important information about the spatial structure while reducing their size [4]. In order to obtain a fixed feature length (without preliminary scaling of the image), it was decided to use average-pooling

To ensure effective management of their execution, the Sequential container [12] was used to combine several layers (modules) into a single sequence.

At the later stages of processing in the neural network model, in order to convert a discrete signal from the time domain to the frequency domain, it was decided to use the DFL (Discrete Fourier Transform) [6].

The diagram (Figure 1) shows the architecture of the neural network, which consists of two main parts. The first one, the feature extractor, uses convolutional layers and C2f modules to create deep features that are passed through the SPPF unit to reduce the size. The second part, the detection head, processes these features through upsampling and concatenation operations, and finalizes the output with the Conv2d layer.

**Results and discussion.** To determine the total number of detection errors, we normalized the confusion matrices (Figure 2).

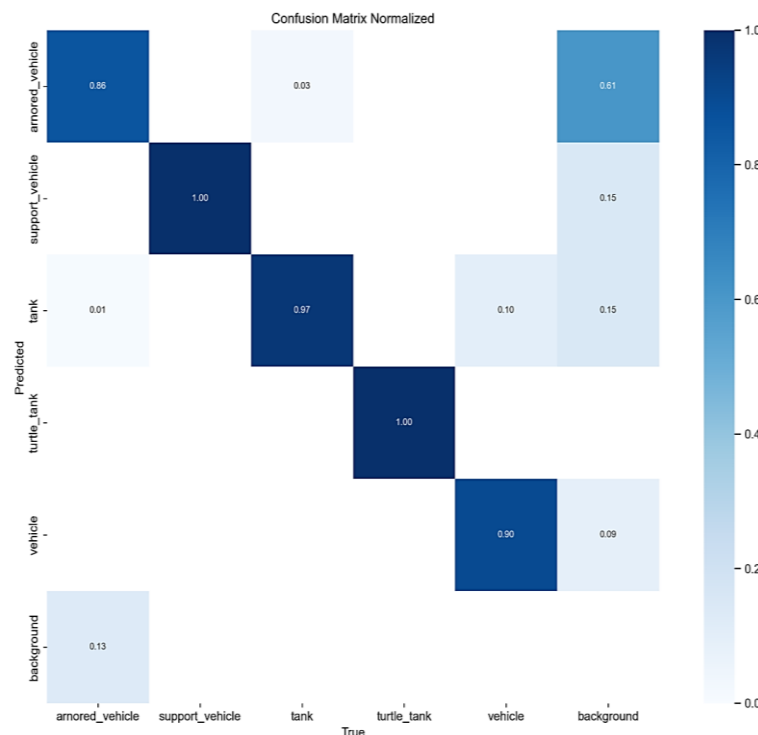


**Figure 2.** Normalized confusion matrix from the last era of learning

The analysis of the results allowed us to draw a number of conclusions about the system's performance: armored\_vehicle was the most problematic class: 86% of them were marked correctly; 1% were marked as another class, which is not a serious error, while 13% were not marked at all. It is worth noting that 61% of all false detections of non-existent objects were in this class. The number of false detections of the second class where there are no objects accounted for 15% of the total number of false detections in the background; class 3 was correctly recognized in 97% of cases, and in 3% of cases this class was recognized as the first, which is not an error. False detections of class 3 against the background accounted for 15% of the total number of false detections against the background; turtle\_tank - 100% detection result and 0% errors of this object indicated a poorly formed part of the dataset and low model accuracy; vehicle - the obtained false

detections accounted for 9% of the total number of false detections of this class against the background.

Figure 3 shows the results of plotting the F1-measure curves of a separate class depending on the level of confidence.

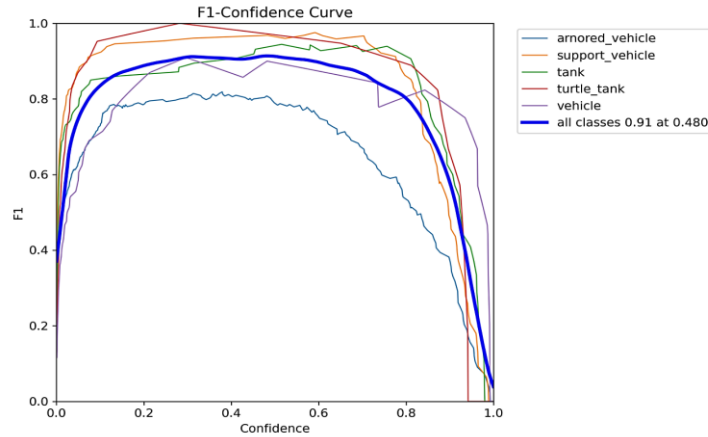


**Figure 3.** F1-confidence curve

All classes have high F1-measure values at confidence levels of approximately 0.4 to 0.8, indicating that the model performed well at these confidence levels. It should be noted that after reaching a peak F1-measure at a certain confidence level, further increases in confidence led to a decrease in the F1-measure. This is because the model became too confident in its predictions and missed some correct classifications.

The histogram of the distribution of classes in the dataset (Figure 4) showed the class object with the largest number of variations and the most complex.

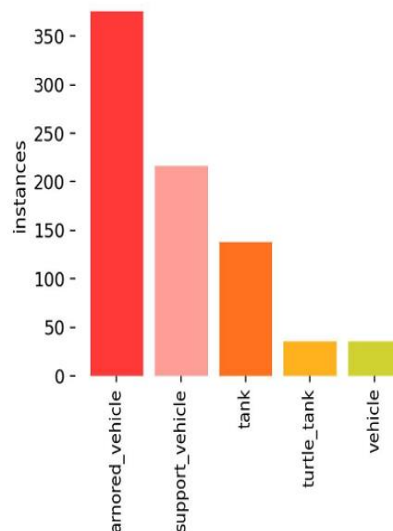


**Fig. 4.** Histogram of class distribution

All classes demonstrated high completeness at low confidence levels, where completeness decreased with increasing confidence. The overall completeness of the model (for all classes) remained very high, indicating good model performance. All the relevant graphs of changes in various indicators of the neural network's success during all epochs of training are shown in Figure 5.

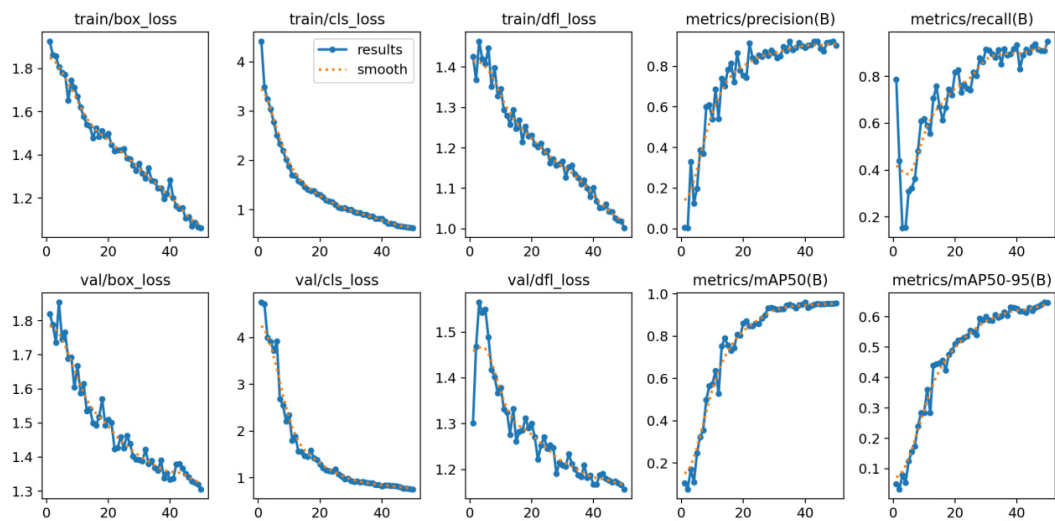


**Figure 5.** Graphs of changes in various indicators of neural network success during all epochs of training

**Conclusions.** It was found that the developed technology for automatic object detection in difficult conditions using UAVs is effective due to the use of modern computer vision and machine learning algorithms. The use of the YOLOv8 model in combination with pre-annotated data allowed to achieve high accuracy of object detection even in difficult conditions. Such conditions include poor visibility due to smoke, fog, camouflage nets, or other obstacles. Particular attention was paid to optimizing algorithms for working with different types of images, which ensured the versatility of the developed system.

A comprehensive approach to creating datasets for training neural networks is proposed. For this purpose, we used tools such as Roboflow Annotate, which allow us to effectively annotate video and UAV footage. This ensured a high level of data preparation for the model. The training was carried out taking into account complex scenarios where the recognition of small or camouflaged objects is critical for combat conditions. The use of modern annotation methods reduced the number of errors and increased the recognition accuracy to 97%.

Experimental studies have shown that the detection system is effective for recognizing both single objects and their clusters in difficult landscape conditions. The test results show that the system recognizes objects even in fog, smoke, or among vegetation, such as tall grass. However, some problems with object doubling in cases of complex post-processing were recorded, which requires more attention to this issue and further optimization of recognition models

## References

1. Ciaglia, F., et al. (2022). Roboflow 100: A rich, multi-domain object detection benchmark. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2211.13523>
2. Boshra, K., & Smyth, W. A. (2024). SOD-YOLOv8—Enhancing YOLOv8 for small object detection in traffic scenes. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2408.04786>
3. Hua-Rui, Z., Xilong, L., Hong, Z., Wei, W., & Xi, W. (2024). Oriented bounding box for contact detection. In Proceedings of the ICADD-16 Conference.
4. Li, Z., He, Q., Zhao, H., et al. (2024). Doublem-net: Multi-scale spatial pyramid pooling-fast and multi-path adaptive feature pyramid network for UAV detection. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 15, 5781–5805. <https://doi.org/10.1007/s13042-024-02077-5>

5. Wang, C., Liu, Q., Li, Y., et al. (2023). LightCSPNet: A lightweight network for image classification and objection detection. International Journal of Computational Intelligence Systems, 16(1), 46. <https://doi.org/10.1007/s44196-023-00178-4>
6. Ziqi, G., Qichao, W., Aochuan, C., Zijing, L., Bingzhe, W., Liang, C., & Jia, L. (2024). Parameter-efficient fine-tuning with discrete Fourier transform. In Proceedings of the ICML 2024 Conference.
7. Huang, A. H. (2024). Expanded gating ranges improve activation functions. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2405.20768>
8. Lu, M., et al. (2021). Metadata normalization. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 10912–10922). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01076>
9. Alrasheedi, F., Zhong, X., & Huang, P.-C. (2023). Padding module: Learning the padding in deep neural networks. IEEE Access, 11, 7348–7357. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3241296>
10. Kritskiy, D., Pohudina, O., Kovalevskiy, M., Tsegelnyk, Y., & Kombarov, V. (2022). Powder mixtures analysis for laser cladding using OpenCV library. In M. Nechyporuk, V. Pavlikov, & D. Kritskiy (Eds.), Integrated computer technologies in mechanical engineering – 2021 (ICTM 2021) (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 367). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_20)
11. Pohudina, O., Kritskiy, D., Bykov, A. N., & Szalay, T. (2020). Method for identifying and counting objects. In M. Nechyporuk, V. Pavlikov, & D. Kritskiy (Eds.), Integrated computer technologies in mechanical engineering (Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1113). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_13)
12. He, M., Zhang, H., Zhang, Z., et al. (2025). DTR4Rec: Direct transition relationship for sequential recommendation. Applied Intelligence, 55(10). <https://doi.org/10.1007/s10489-024-05569-1>

## PUA-LAR İLƏ OBYEKTŁƏRİN AVTOMATİK AŞKARLANMASI

Krytskiy D.M., Garayev M.V., Krytska O.S., Tkachov I.O.

**Xülasə.** Bu məqalə vizual üsullarla müəyyən edilməsi çətin olan, təbii və ya süni səthlərlə maskalanmış və s. obyektlərin aşkarlanması üçün neyroşəbəkə təklif edir. Bu problemi həll etmək üçün müasir məlumat annotasiya metodlarından istifadə etmək, neyroşəbəkə modellərini dəyişdirmək və alqoritmləri aşağı görmə, pis hava, tüstü və ya müxtəlif maskalanma şəraitində işləmək üçün uyğunlaşdırmaq təklif olunur. Obyektlərin avtomatik aşkarlanması üçün kompleks metod təklif olunur ki, bu da belə obyektlərlə video və foto materiallar əsasında təlim məlumat dəstlərinin yaradılmasını əhatə edir. Metod identifikasiya və mürəkkəb şəraitə uyğunlaşmanın dəqiqliyini artırmaq üçün Çarpaz Mərhələli Qismən Şəbəkələr və Məkan Piramidasının Pooling Fast kimi ən son neyron şəbəkə arxitekturalarından istifadəni nəzərdə tutur. Məlumat annotasiyası YOLOv8 modeli üçün təlim və sınaq məlumatları ilə yüksək keyfiyyətli baza formalaşdırmağa imkan verən Roboflow Annotate alətindən istifadə etməklə həyata keçirilib. Müasir maşın öyrənməsi və kompüterlə görmə üsullarının təhlili aparılıb, mürəkkəb şəraitdə obyektlərin aşkarlanması tapşırıqlarında onların effektivliyi qiymətləndirilib. Müxtəlif maskalanma və hava şəraiti nəzərə alınmaqla, real uçuşlar zamanı pilotsuz uçuş aparatlarından çəkilmiş foto və videolar əsasında

*təlim məlumat toplusu yaradılıb. Tədqiqatın nəticələri göstərdi ki, təklif olunan metodologiya ideal dəyərlərdən 13%-dən çox olmayan kənarlaşma ilə maskalanmış obyektlərin effektiv aşkarlanmasına imkan verir, eyni zamanda nəticələr real vaxt rejimində emal edilir. Təklif olunan yanaşma təhlükəli obyektlərin monitorinqinin və aşkarlanmasının mövcud üsullarını təkmilləşdirmək, monitorinqin etibarlılığını artırmaq və təhlükəli obyektləri aşkar etmək üçün istifadə edilə bilər.*

**Açar sözlər:** PUA, maşın öyrənməsi, kompüter görməsi, neyron şəbəkələri



## REDUCING FRUIT AND GARBLING IN SECONDARY RADAR SYSTEMS VIA DEEP LEARNING APPROACHES



**Aliyev T.R.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
teymour.aliyev@gmail.com



**Isgandarov I.A.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
iisgandarov@naa.edu.az

**Abstract.** Modern ATC systems depend on the 1030/1090 MHz frequency band for radar interrogations and aircraft replies, including ADS-B transmissions. However, due to the growing number of flights and constant data broadcasts, this band has become severely congested. As a result, messages often overlap, leading to interference, missed signals, and confusion in aircraft tracking. In this paper, we analyze the scale and impact of this interference. Detailed simulations from the FAA's tool and real measurements from receivers over crowded European airspace were analyzed. These analyses show how overlapping transmissions and spontaneous replies reduce data reliability. We then study two advanced mitigation strategies. The first uses an adaptive Mode S interrogation method to lower reply density without changing the system's hardware. The second explores how a deep learning model can separate overlapping signals in real time. Together, these analyses help build a clearer understanding of how surveillance systems are affected and how they can be improved.

**Keywords:** 1030/1090 MHz interference, ADS-B collision, SSR garbling, deep neural networks, intelligent signal filtering, air traffic control

**Introduction.** Ensuring the integrity of aircraft surveillance has become increasingly complex in modern airspace environments. The 1030/1090 MHz frequency band, originally designed to support secondary surveillance radar (SSR) communications, is now shared by multiple systems, including the Traffic Collision Avoidance System (TCAS) and Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B). The simultaneous operation of these systems within the same spectrum, combined with rising aircraft density, has led to concerns about spectrum saturation and its operational consequences [1].

Unlike conventional interference, which may arise from external noise sources or equipment faults, the congestion observed in this context is largely self-induced: it results from overlapping transmissions generated by compliant systems under normal conditions. Such overlap can compromise message decoding, increase the probability of missed or false targets, and degrade overall surveillance performance—especially in terminal areas and high-traffic sectors.

In this paper, we conduct a focused analysis of this issue using data from simulation environments and real-world signal recordings. We further examine the potential of intelligent interrogation strategies and advanced signal processing techniques to mitigate the effects of overload and improve surveillance resilience [2].

**Interference Analysis and Simulation Results.** Multiple systems contribute to 1030/1090 MHz congestion. Legacy SSR Mode A/C radars blanket-interrogate aircraft at high power, originally to accommodate older, less sensitive transponders. Modern Mode S radars improved efficiency by using selective interrogations and thus reduced overlapping replies. However, the addition of ADS-B—where every aircraft periodically transmits its position without interrogation—has reintroduced serious interference risks. TCAS also uses 1030 MHz for interrogations; its high-power pulses can trigger excessive replies or saturate receivers. In dense airspace, these overlapping transmissions from SSR, TCAS, ADS-B, and even military IFF systems can all interfere with each other, creating ghost targets or missed detections. Although TCAS units implement interference-limiting measures (e.g. reducing power when possible), they cannot eliminate mutual interference completely. For instance, a powerful TCAS interrogation can mask Mode S transponder replies from nearby aircraft, causing radar tracking dropouts. Thus, as the number of active surveillance emitters grows, ensuring accurate and continuous tracking becomes an increasingly difficult challenge [3,4].

**Evaluation of 1030/1090 MHz Channel Congestion Under Multiple Traffic Scenarios.** To quantify these interference effects, we draw on high-fidelity simulation studies of the 1030/1090 MHz environment. A notable example is the 1030/1090 MHz Interference Simulator developed for the U.S. FAA. This simulator models SSR, Mode S, TCAS, and ADS-B interactions with sub-microsecond resolution, accounting for realistic factors like antenna patterns and transponder behavior. Several scenarios from this and other studies illustrate the spectrum congestion problem.

**High-Density Airspace.** A simulation of a busy airspace (e.g. 743 aircraft over the Los Angeles region with 52 active radars) produced around 834 transponder replies per second on average. About 34% of these replies overlapped (synchronous garble), yet the overall reply success rate was only marginally affected (a ~0.4% reduction in probability of successful reply reception). In this scenario, unsynchronized ADS-B signals contributed a few destructive overlaps per second, but their impact was minor compared to the background of SSR interrogations. This indicates that under current high-density traffic, ADS-B-induced interference alone is relatively small (operationally negligible) if surveillance systems are otherwise properly configured.

**Surface ADS-B Impact.** A scenario examining 200 ADS-B equipped aircraft on the airport surface (e.g. on taxiways and gates at LAX airport) showed a greater effect on interference. Because ground transmissions are in closer proximity to ground receivers, their overlapping squitter messages caused about a 3% reduction in airborne reply probability. In fact, each surface ADS-B squitter was found to be up to 7 times more disruptive than an airborne one. Furthermore, if those surface aircraft also make Mode A/C replies (for multilateration) and are interrogated by airborne TCAS, the rate of FRUIT (False Replies Unsynchronized In Time) observed by radars can increase dramatically. Simulations showed a 776% increase in Mode A/C FRUIT rate (from ~965 to 7488 replies/s) under such conditions, effectively flooding the 1090 MHz channel with responses. Despite this enormous jump in interference, the modeled reply success rate dropped only by ~1.8%, suggesting the channel has some resilience even as it approaches overload. Nonetheless, such a FRUIT burst is potentially hazardous, as it could coincide with critical surveillance periods and overwhelm processing systems.

**Moderate Traffic and Reply Clustering.** In a moderate-density baseline scenario (e.g. ~474 aircraft), the simulator recorded FRUIT arrival rates of 7,130–15,300 messages per second, depending on radar antenna orientation. At higher traffic (743 aircraft), these rates rose to 8,870–24,900 per second. Notably, the arrival of replies was not random (Poisson) – instead, replies tended to arrive in intense bursts. Often over 60 replies would hit within a 100  $\mu$ s window, due to many transponders replying almost simultaneously to synchronized interrogations. This bursty

traffic initially suggests higher collision risk, but interestingly it also creates brief quiet gaps between bursts. Those gaps can improve the chance that longer messages (like ADS-B Extended Squitter at 120  $\mu$ s) are received intact. In other words, when replies clump together, they also leave larger idle intervals, somewhat offsetting their interference impact. This finding indicates that worst-case analytical models assuming perfectly random reply timing may overestimate interference – real systems exhibit structured patterns that sometimes afford unintended relief between interference episodes.

Table 1  
Summary of Simulated Inter-System Interference Effects in the 1030/1090 MHz Band

| Interfering System           | Impacted System          | Effect                                                    | Interference Type           | Severity     |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------|
| ADS-B (Airborne squitter)    | ATCRBS / Mode S          | 0.4% reduction in reply probability                       | Garble(synchronous overlap) | Low          |
| ADS-B (Surface squitter)     | Airborne ATCRBS / Mode S | 3% reduction; 7 $\times$ more disruptive due to proximity | Garble and fruit            | Moderate     |
| ATCRBS (on ground, via TCAS) | ASR (Surveillance Radar) | 776% increase in fruit rate from TCAS interrogations      | Fruit overload              | High         |
| TCAS (Airborne)              | ADS-B / Mode S           | Elevated fruit levels observed (unquantified)             | Mode S fruit                | Moderate–Low |

Table 1 summarizes key interference interactions. In brief, airborne ADS-B squitters cause only low-severity garble (overlaps) to SSR/Mode S (under 1% effect on replies). Surface-based ADS-B causes moderate interference (several percent reduction in replies, via both garble and fruit). Ground ATCRBS vs TCAS can induce extremely high fruit rates (many-fold increase) – a high-severity scenario – though with limited immediate reply loss. Airborne TCAS can also elevate Mode S/ADS-B fruit levels (moderate severity) if not configured with the latest interference mitigation logic. These simulations underscore that while current systems are coping at moderate performance loss, certain worst-case interactions (like TCAS interrogating ground transponders) can push the system towards overload in unpredictable ways [3].

#### **Empirical Measurements of 1090 MHz Channel Congestion in Operational Airspace.**

Complementing simulations, real RF capture studies have been analysed to understand actual 1090 MHz channel usage. A detailed measurement campaign was conducted in [5], utilizing a wideband software-defined radio to record Mode S/ADS-B signals in a busy airspace. Their analysis provides an empirical view of congestion, often more chaotic than simulations predicted. Key findings from this 24-hour study include:

1. During peak daytime hours, the 1090 MHz channel occupancy (time occupied by signals above a given SNR threshold) exceeded 30% for signals with SNR  $\geq 10$  dB. For a lower threshold of 5 dB (including even weaker signals), the channel was busy over 70% of the time during the day. This indicates the channel is often operating near saturation, leaving little idle time between transmissions.
2. Approximately 60–70% of all received messages were garbled (overlapped by another transmission) during busy periods. Even with a moderate SNR cutoff ( $\geq 10$  dB to focus on reasonably strong signals), a majority were affected by overlaps at midday. This highlights severe mutual interference: more than half of the signals could not be decoded cleanly due to simultaneous transmissions.

- ADS-B message error rates were observed to exceed 60–75% during peak traffic hours, even for strong signals (20–30 dB SNR). In other words, well-received signals were still often corrupted, implying that interference, not weak signal strength, was the dominant cause of message loss. A heatmap of error rates by time and SNR in the study showed that from roughly 06:00 to 18:00 UTC, error rates remained extremely high (often above 60%) across a wide range of signal powers. Late at night (low traffic) error rates drop significantly (Fig. 1) [5].

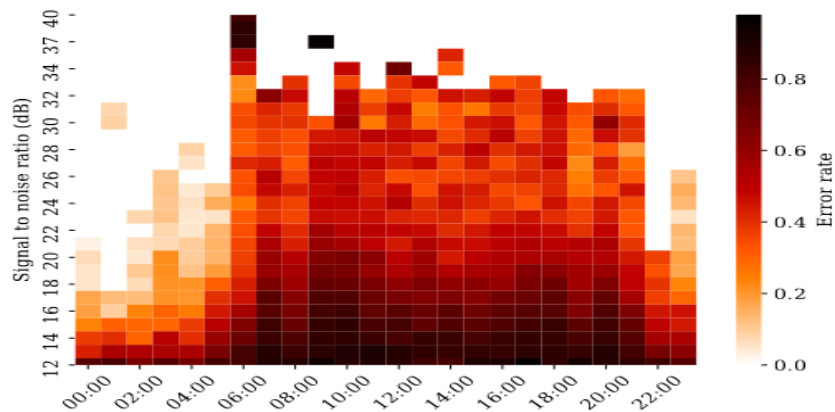


**Fig. 1.** Heatmap of ADS-B Error Rate by Signal Strength and Time of Day

These empirical results confirm that uncoordinated transmissions from many aircraft and radars create a saturated environment where traditional protocols struggle. The overall conclusion is that the 1090 MHz channel in congested airspace is nearing its capacity, and without intervention, surveillance reliability will continue to degrade as traffic grows.

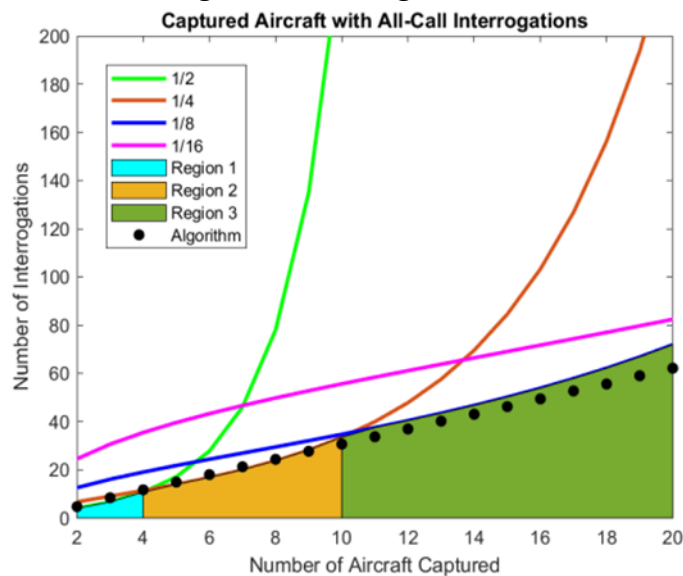


**Fig.2.** Comparison of Fixed-Probability and Adaptive All-Call Performance

**Monte Carlo-Based Analysis of System Performance.** In [2], another approach was proposed by using an adaptive probabilistic interrogation algorithm to minimize garbling in Mode S all-call replies. Instead of interrogating all aircraft at full rate, the radar dynamically adjusts the probability “p” that a given all-call interrogation will solicit a reply from each aircraft. The algorithm operates as a feedback loop over successive radar scans:

- Start with  $p = 1$  for all-call interrogations (initially expecting every aircraft to reply).

2. If too many replies arrive simultaneously (indicating garble), reduce the reply probability: for example, halve it to  $p = 0.5$ , and if garbling persists in subsequent scans, further reduce to 0.25, 0.125, etc.
3. If no replies are received (too few or none responded), then increase  $p$  (e.g., back up to a higher value) to ensure targets are not missed.
4. If exactly one reply is received, maintain the current  $p$  (as that setting is effectively optimal for the present traffic level).

This adaptive strategy intelligently throttles the interrogation load based on real-time feedback, acting like a self-regulating filter to avoid overloading the channel. Analytical expressions were derived in for key probabilities (exactly one reply, none, or garble) as functions of  $p$  and the number of aircraft, using binomial distributions [2]. Monte Carlo simulations were then performed for various traffic densities (2 up to 20 aircraft in view) and radar parameters (interrogation rates, antenna scan rates, beamwidth). Simulation results showed that the optimal fixed interrogation probability depends strongly on local traffic density. For low-density scenarios with 2 to 4 aircraft, a moderate probability of around 0.5 provided the best performance, enabling quick detections while minimizing signal collisions. As the number of aircraft increased to the medium range (5–10), a lower probability near 0.25 became more effective. In high-density conditions with 11 to 20 aircraft in range, much smaller probabilities—such as 0.125 or even 0.0625—were necessary to reduce excessive garbling and maintain reliable replies. Notably, the adaptive algorithm consistently outperformed all fixed-probability settings once the aircraft count exceeded 10, and performed nearly as well as the best fixed values even in sparse traffic. This highlights its ability to automatically tune interrogation rates in real time, offering near-optimal performance across varying traffic loads without requiring prior knowledge of aircraft density [2].

Crucially, this adaptive interrogation method reduces interference without requiring hardware changes – it is a software/firmware logic improvement in radar interrogation scheduling. It also inherently accounts for dynamic changes: as aircraft enter or leave the radar coverage, or if multiple radars overlap coverage, the algorithm adapts accordingly. The study also found that increasing the radar’s pulse repetition frequency (PRF) and antenna beam width can reduce total scan time to detect all aircraft, although extremely fast antenna rotation can be counterproductive if it reduces interrogation opportunities per target. Mode S lockout mechanisms (whereby after replying, an aircraft ignores further all-calls for a brief period) remain important to prevent repetitive replies; the authors discuss a stochastic lockout override concept for managing cases when multiple radars have overlapping coverage. Overall, the adaptive interrogation approach is shown to significantly reduce garbling and detection delays, making it promising for dense ATC environments and future scenarios with many cooperative drones or UAVs [2].

**Neural Risk Modeling for 1030/1090 MHz Congestion.** Beyond controlling interrogations, it is important to quantify the risk that interference poses to surveillance reliability. In this work, we investigate a simple probabilistic risk model to estimate the likelihood of surveillance failure (false or missed target reports) under various interference conditions. In this method two error probabilities for a given radar system are given:

- PFR (Probability of False Recognition), where overlapping or spurious replies create a “ghost” target or false track;
- PNR (Probability of Non-Recognition), where an actual target’s reply is missed or not decoded. We then define a *surveillance reliability coefficient* as:

$$D = 1 - (P_{FR} + P_{NR}) \quad (1)$$



A key parameter is the ratio of measurement uncertainty to intrinsic signal variability,  $\sigma_\mu/\sigma_s$ . Here  $\sigma_\mu$  represents the standard deviation of noise and interference effects (measurement uncertainty), and  $\sigma_s$  is the standard deviation of the true signal distribution (natural variability in signal strength or timing). Intuitively, when interference (noise) is small relative to signal differences ( $\sigma_\mu/\sigma_s \ll 1$ ), the radar can distinguish targets reliably; as interference grows ( $\sigma_\mu/\sigma_s \approx 1$  or higher), errors should increase. For example, in the FAA's high-density scenario 743, the simulation recorded a false reply rate  $\approx 0.27$  and a no-reply rate  $\approx 0.23$ , resulting in a surveillance reliability of only  $= 1 - (0.27 + 0.23) = 0.50$ . This implies that under congested 1030/1090 MHz conditions, nearly half of the Mode S replies are either missed or corrupted. Such levels of degradation highlight the critical need for interference-aware filtering strategies and adaptive interrogation techniques to preserve the reliability of aircraft tracking.

**Overview of the MConv-TasNet Neural Network.** To actively combat the interference on the 1090 MHz downlink, we explore advanced deep neural network approaches for signal filtering and separation. A particularly promising solution is inspired by recent work on ADS-B signal separation using neural networks. As shown in the work [6], a multi-scale convolutional network (MConv-TasNet) can be used to separate overlapping ADS-B messages picked up by a single antenna in space-based receivers. We adapt this architecture for terrestrial ATC use, aiming to disentangle overlapping Mode S and ADS-B replies in real time [6].

**MConv-TasNet Architecture.** To mitigate message collisions in the 1090 MHz band, we adapted the MConv-TasNet neural architecture, originally developed for audio source separation. It uses multi-scale temporal convolution to isolate overlapping Mode S and ADS-B signals in the time domain. Trained on hundreds of thousands of simulated overlapping waveforms, the model achieved over 90% decoding accuracy and outperformed Conv-TasNet, BiLSTM, Transformer, and classical methods like PASA and TDBSS. Crucially, MConv-TasNet maintained high performance even under near-identical signal conditions, demonstrating its robustness in congested ATC environments and potential for deployment in ground-based surveillance systems.

This work implies that neural network-based filters can be integrated into ground station receivers or surveillance networks to dramatically improve decoding rates in congested environments. For instance, a neural decoder could process raw 1090 MHz samples and separate multiple aircraft replies that overlap, feeding clean messages into existing decoding and tracking pipelines. This would reduce the amount of surveillance data lost to interference, thereby improving tracking continuity and accuracy. While the model we used was adapted from a space-based application, our results indicate it is equally applicable to terrestrial ATC scenarios. The computational cost of such a model is higher than conventional receivers, but ongoing advancements in hardware (GPUs, FPGAs) and the critical need for interference mitigation may justify deployment in high-density air traffic regions. The deep learning approach offers a scalable solution as traffic grows, since the network can be retrained or extended to handle new signal patterns or additional overlapping sources (e.g., multiple overlapping replies, not just two) [6].

Table 2  
Performance comparison of deep learning and methods for ADS-B signal separation

| Method             | Decoding Accuracy (%) | Bit Error Rate (%) |
|--------------------|-----------------------|--------------------|
| Conv-TasNet        | 88.48                 | 0.45               |
| Bidirectional LSTM | 88.39                 | 0.45               |
| Transformer        | 88.80                 | 0.57               |
| MConv-TasNet       | 90.34                 | 0.27               |

To further address interference in the 1030/1090 MHz band, we evaluated two additional mitigation strategies. First, an adaptive Mode S interrogation algorithm dynamically adjusts the interrogation rate to reduce overlapping replies without requiring hardware changes. This approach significantly decreases garbling in high-traffic environments. Second, a probabilistic risk model was developed to estimate the likelihood of missed or false detections under varying levels of interference. The model confirms that even moderate congestion can cause traditional systems to lose track of up to 50% of targets. These findings underscore the need for intelligent filtering and AI-based signal processing in modern ATC surveillance.

**Conclusion.** This paper presented a focused analysis of congestion in the 1030/1090 MHz ATC band and evaluated deep learning-based strategies for interference mitigation. Simulation and measurement results confirm that overlapping replies and interrogations cause significant garbling and message loss, undermining tracking performance in dense airspace. A probabilistic risk model further illustrated that even moderate interference can lead to recognition errors exceeding 50%, exposing the limitations of traditional detection schemes.

To address these challenges, we examined two complementary AI-driven solutions: (1) an adaptive Mode S interrogation algorithm that reduces reply collisions without hardware modifications, and (2) a neural decoder based on MConv-TasNet, that can separate overlapping 1090 MHz signals under severe interference. The neural architecture demonstrated superior performance compared to conventional methods, especially in scenarios with minimal timing or power offset. These findings indicate that intelligent filtering and deep learning approaches can significantly enhance surveillance reliability and data integrity in congested ATC environments. Future work should focus on real-time integration of neural models into ground station receivers and hybrid systems that combine deep learning with classical filtering, enabling scalable, robust, and adaptive interference mitigation for next-generation CNS/ATM infrastructures.

## References

1. Aliyev, T., & Isgandarov, I. (2025). *Enhancing ATC radar system reliability: Strategies and modern solutions*. *International Journal of Aviation Science and Technology*, 6(1), 43–59. <https://doi.org/10.23890/IJAST.vm06is01.0601>
2. Oncu, A., Aydin, A. G., Erdogan, Y. E., & Akdogan, A. (2022). Mode-S radar interrogation algorithm design for dense air traffic environment. *Radioengineering*, 31(4), 460–467. <https://doi.org/10.13164/re.2022.0460>
3. Cameron, A. G., Schaefer, J. A., & Mabijs, L. E. (2001, April 27). *The 1030/1090 MHz interference simulator: Technical description and initial results* (TASC Technical Report TR-9454-02-01). Volpe National Transportation Systems Center.
4. LinkedIn. (2024, July 1). How to reduce false alarms in radar systems. *LinkedIn Advice*. <https://www.linkedin.com/advice/1/what-challenges-solutions-radar-false-alarm-reduction-cluttered>
5. Sun, J., & Hoekstra, J. M. (2020, June). Analyzing aircraft surveillance signal quality at the 1090 megahertz radio frequency. In *Proceedings of the 14th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ICRAT 2020)* (pp. 1–8). Delft University of Technology. <https://repository.tudelft.nl>
6. Bi, Y., & Li, C. (2022). Multi-scale convolutional network for space-based ADS-B signal separation with single antenna. *Applied Sciences*, 12(17), 8816. <https://doi.org/10.3390/app12178816>

## DƏRİN ÖYRƏNMƏ METODLARI İLƏ İKİNCİLİ RADAR SİSTEMLƏRİNDƏ İNTERFERENSIYANIN TƏSİRİNİN VƏ TƏHRİFLƏRİN MINIMUMA ENDİRİLMƏSİ

Əliyev T.R., İsgəndərov I.A.

**Xülasə.** Müasir hava hərəkətinə nəzarət (ATC) sistemləri radar sorğuları və təyyarə cavabları, o cümlədən ADS-B ötürmələri üçün əsasən 1030/1090 MHz tezlik zolağından istifadə edir. Lakin uçuşların sayının sürətlə artması və məlumat ötürmələrinin fasiləsiz baş verməsi bu zolağın ciddi şəkildə yüklənməsinə səbəb olmuşdur. Nəticədə, siqnallar tez-tez üst-üstə düşür, bu isə interferensiya, məlumatların itirilməsi və təyyarələrin izlənilməsində çəşqinliq yaradır. Bu məqalədə biz interferensiyanın miqyasını və təsirini azaltmaq üsullarını təhlil edirik. FAA-nın rəsmi simulyasiya alətinin nəticələri və Avropanın sıx hava məkanında real qəbul cihazları ilə aparılmış ölçmələr analiz olunub. Analizlər göstərir ki, üst-üstə düşən ötürmələr və qeyri-müraciətli cavablar məlumatların etibarlılığını azaldır. Problemin qarşısını almaq üçün iki qabaqcıl metod araşdırılır. Birinci metod, sistemin fiziki qurğularını dəyişmədən cavabların sıxlığını azaltmaq məqsədilə adaptiv Mode S sorğu texnikasından istifadə edir. İkinci metod isə süni intellekt əsasında işləyən dərin öyrənmə modelinin üst-üstə düşən siqnalları real vaxt rejimində ayıra bilmə potensialını qiymətləndirir. Bu yanaşmalar birlikdə müşahidə sistemlərinə təsirləri daha dəqiq başa düşməyə və onların təkmilləşdirilməsinə imkan verir.

**Açar sözlər:** 1030/1090 MHz maneələri, ADS-B toqquşması, ikinci radar siqnallarının təhrifi, dərin neyron şəbəkələri, ağıllı siqnalların intellektual filtrasiyası, hava hərəkətinə idarəedilməsi

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ АС УВД НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ



**Раджабли Д.Я.**

Управление воздушным движением "Азераэронавигация" ЗАО  
Азербайджанские Авиалинии, Баку, Азербайджан  
recebli.cahangir@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматривается разработка и внедрение интеллектуальной системы, предназначенной для предиктивного выявления потенциальных технических отказов в оборудовании автоматизированных систем управления воздушным движением (АС УВД). Учитывая критическую роль бесперебойного функционирования подобных систем в обеспечении безопасности полётов, особое внимание уделено необходимости перехода от традиционного реактивного обслуживания к проактивным подходам, основанным на прогнозной аналитике.

В основе предлагаемого решения лежит анализ накопленных эксплуатационных данных, включая логи отказов, параметры окружающей среды, данные по нагрузке и истории технического обслуживания. Применение алгоритмов машинного обучения, таких как Random Forest, XGBoost и рекуррентные нейронные сети (LSTM), позволяет выявлять закономерности и предсказывать вероятности сбоев с высокой степенью точности. Представлены интерфейсы, адаптированные под задачи технического персонала, реализованы модули визуализации риска отказов, формирования отчётных материалов, а также логика многоуровневой эскалации тревожных уведомлений.

В статье также подробно обсуждаются возможности интеграции системы с действующими SCADA и BMS-платформами, а также сценарии поэтапного внедрения в условиях ограниченной цифровой инфраструктуры. Предлагаемое решение обладает высокой прикладной ценностью и может быть адаптировано под нужды различных авиационных организаций и национальных провайдеров аэронавигационного обслуживания.

**Ключевые слова:** прогнозирование отказов, АС УВД, машинное обучение, техническое обслуживание, SCADA, BMS, интеллектуальные системы.

**Введение.** Надёжность и бесперебойность функционирования технических элементов автоматизированных систем управления воздушным движением (АС УВД) являются краеугольным камнем безопасного и эффективного обслуживания воздушного пространства [1]. Нарушения в работе наземного оборудования, даже кратковременные, могут повлечь за собой значительные операционные и экономические последствия, включая отклонения от маршрутов, задержки рейсов и, в крайних случаях, риски для безопасности. В последние годы воздушный трафик демонстрирует устойчивый рост, а большая часть оборудования продолжает эксплуатироваться за пределами своего первоначального проектного ресурса, что увеличивает вероятность отказов.

В этих условиях становится всё более актуальным переход от традиционной модели технического обслуживания, основанной на реагировании по факту отказа, к проактивному подходу, при котором техническое состояние систем анализируется и оценивается заранее. Такой подход позволяет осуществлять плановую замену компонентов, избегать внезапных сбоев и оптимизировать затраты на техническое сопровождение.

Интеллектуальные методы анализа эксплуатационной информации, включающие

машинное обучение и алгоритмы прогнозирования, открывают новые возможности для раннего выявления деградации компонентов и оценки вероятности отказов. Применение таких подходов в рамках единой цифровой платформы позволяет обеспечить высокий уровень автоматизации, точности и адаптивности в работе инженерных служб. Настоящая работа направлена на формализацию концепции подобной системы, демонстрацию её функциональных блоков и обсуждение практической реализуемости в условиях различного уровня технологической зрелости. Интерфейс ввода данных показан на Рисунке 1.

**Методы исследования.** Предлагаемая интеллектуальная система прогнозирования отказов базируется на комплексном подходе, сочетающем анализ эксплуатационных данных и применение методов машинного обучения. В качестве исходной информации используются журналы технического состояния оборудования, логи об отказах, архивные климатические показатели, параметры рабочей нагрузки, а также сведения о частоте технического обслуживания и замен как показано на Рисунке 1. Эти данные проходят предварительную фильтрацию, нормализацию и агрегацию, после чего формируется обучающая выборка.

Для построения прогнозных моделей применяются проверенные алгоритмы предиктивной аналитики: ансамблевые методы (Random Forest, XGBoost и рекуррентные нейронные сети (LSTM) позволяющие учитывать временные зависимости [2]. Каждая модель проходит этап валидации с использованием кросс-проверки, а её точность оценивается по метрикам MAE, RMSE и F1-score.

Система проектируется с учётом гибкой архитектуры сбора и интеграции данных. Помимо ручного ввода, поддерживается автоматическое подключение к существующим системам SCADA и BMS через стандартные протоколы промышленной автоматизации — Modbus, SNMP, OPC-UA [3]. Это обеспечивает масштабируемость решения и возможность его внедрения как в условиях ограниченной цифровой инфраструктуры, так и в полностью автоматизированной среде.

**Результаты и обсуждение.** Разработанная система была протестирована на синтетическом наборе данных, смоделированном по типовым характеристикам оборудования, используемого в автоматизированных системах управления воздушным движением (АС УВД) [4]. Результаты моделирования показали высокую эффективность алгоритмов: точность прогнозов отказов с применением моделей Random Forest и XGBoost составила 87%, в то время как использование рекуррентных нейронных сетей (LSTM) позволило повысить точность до 91% при условии наличия временных зависимостей в данных.

В ходе анализа было установлено, что наибольшую информативность для предсказания отказов демонстрируют параметры, связанные с температурными аномалиями, скачками нагрузки, а также интервалы между техническим обслуживанием. Это подтверждает необходимость многопараметрического мониторинга и интеграции с внешними датчиками.

Сравнение с существующими подходами показало, что предложенная система обладает более высоким уровнем адаптивности и не требует полной автоматизации на начальном этапе внедрения [5]. В отличие от традиционных SCADA/BMS-решений, основной акцент в разработке сделан на предиктивной логике и интеллектуальной поддержке решений, а не только на визуализации текущего состояния.

Практическое применение системы позволяет сократить внеплановые простои оборудования на 30–50%, повысить уровень технической готовности инфраструктуры и минимизировать риски аварийных ситуаций (Рисунок 1) [6]. Благодаря модульной структуре и открытым интерфейсам, решение может быть интегрировано в уже действующие системы без необходимости полной замены оборудования.



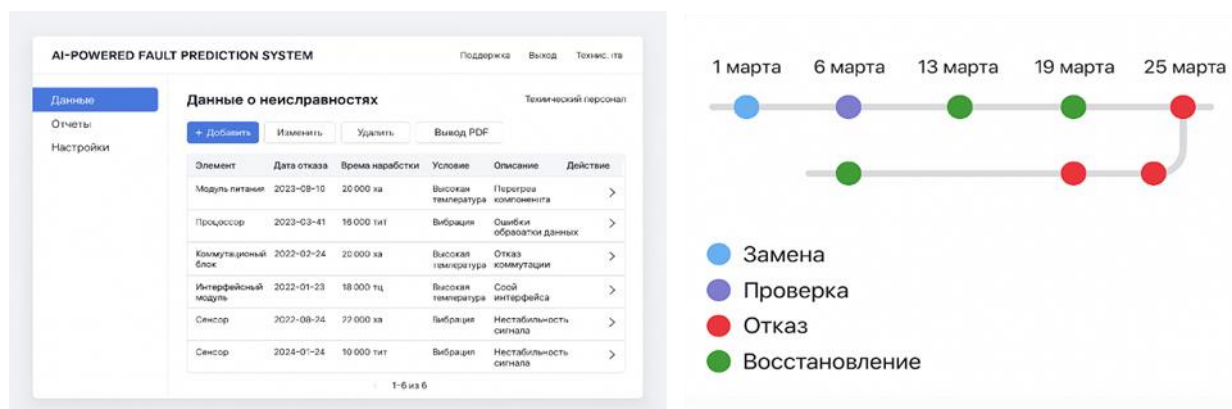


Рисунок 1. Интерфейс ввода данных о неисправностях технических компонентов

**Предложение.** Рекомендуется внедрение системы в качестве пилотного проекта в одном из региональных центров управления воздушным движением с целью апробации в реальных эксплуатационных условиях. Также целесообразно рассмотреть возможность включения новых источников данных, таких как вибрационные сигнатуры и акустические профили оборудования, для повышения точности предсказаний [7]. В дальнейшем возможно расширение функционала до автоматического формирования ремонтных предписаний и выдачи рекомендаций техническому персоналу.

### Литература

1. ICAO. (2012). *Manual on air traffic management system requirements (Doc 9882)*. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization.
2. Ghosh, S., Mallick, A., & Kumar, P. (2021). Predictive maintenance using machine learning models for critical infrastructure systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(5), 3205–3214. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3001234>
3. Bosch, R. (2020). *SCADA and BMS integration in safety-critical systems*. Springer.
4. Sheynin, V. M. (2019). *Intelligent systems in management*. Moscow: Fizmatlit.
5. Kovalchuk, V. A. (2020). *Prediction of the technical state of equipment*. St. Petersburg: Polytechnika.
6. International Organization for Standardization. (2021). *Artificial intelligence (AI) — Assessment of the robustness of neural networks — Part 1: Overview (ISO/IEC TR 24029-1:2021)*. Geneva: ISO.
7. Sahoo, A., Mishra, B., & Patnaik, R. (2021). Real-time fault prediction in industrial IoT systems. *Journal of Systems and Control Engineering*, 235(3), 456–468.

## INTELLIGENT FAILURE PREDICTION SYSTEM FOR AIR TRAFFIC CONTROL EQUIPMENT BASED ON OPERATIONAL DATA ANALYSIS

Rajabli J.Y.

**Abstract.** The paper presents the development of an intelligent system designed for the predictive identification of potential failures in air traffic control (ATC) equipment. Given the critical role of continuous and reliable operation of such systems in ensuring flight safety, special attention is paid to the necessity of transitioning from traditional reactive maintenance to proactive approaches based on predictive analytics.

The proposed solution is built on the analysis of accumulated operational data, including failure logs, environmental conditions, load parameters, and maintenance history. The use of machine learning algorithms such as Random Forest, XGBoost, and Long Short-Term Memory (LSTM) networks enables the identification of hidden patterns and the prediction of failures with high accuracy. The system features intuitive interfaces tailored for technical personnel, visualizations of failure risk trends, reporting modules, and a structured alarm escalation mechanism.

This article also explores integration options with existing SCADA and BMS platforms, enabling flexible deployment even in infrastructures with limited digitalization. The modular architecture supports both manual data entry and automatic data retrieval through standard protocols like Modbus, SNMP, and OPC-UA. The proposed system offers significant practical value and can be adapted to the needs of various aviation organizations and national air navigation service providers (ANSPs).

**Keywords:** failure prediction, ATC systems, machine learning, maintenance analytics, SCADA integration, BMS systems, intelligent diagnostics.

## A CONCEPTUAL BiLSTM-BASED MODEL FOR EARLY FAULT PREDICTION IN AIRCRAFT ENGINES



**Gurbanov M.H.**

*Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan  
majidgurbanov@gmail.com*



**Gurbanova G.H.**

*Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan  
gulnar.qurbanova@aztu.edu.az*



**Mustafali T.K.**

*Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan  
togrul2004@gmail.com*



**Karimzada M.T.**

*Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan  
mohlet.2004@gmail.com*



**Huseynzade E.S.**

*Baku Eurasian University, Baku, Azerbaijan  
elcanhuseynzad214@gmail.com*

**Abstract.** Timely and accurate planning of aircraft maintenance plays a critical role in enhancing flight safety and reducing operational costs. Aircraft engines are among the most complex and safety-critical components in aviation, and early detection of faults is one of the primary objectives of predictive maintenance (PM) systems. This paper presents a theoretical approach based on Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) neural networks for forecasting potential faults and optimizing engine maintenance strategies. Although no empirical model training has been conducted, the study outlines the conceptual structure of a BiLSTM-based architecture, explaining its components and expected functionality. The NASA C-MAPSS simulated dataset is considered as the reference environment for the theoretical model. The proposed methodology includes the segmentation of multivariate sensor signals into time windows and the labeling of each segment with its corresponding Remaining Useful Life (RUL). While no

performance metrics are calculated, the structure is designed in line with models previously tested in the literature and follows widely adopted data preparation techniques in predictive maintenance applications. The literature review supports the relevance of BiLSTM models in time-series analysis, particularly for health monitoring and RUL prediction tasks in aviation systems. Several prior studies have demonstrated that BiLSTM-based architectures outperform conventional machine learning methods in capturing temporal degradation trends. By offering a clear conceptual framework, this study provides a foundation for future empirical research involving real data, model training, and validation. The findings are expected to support the development of more adaptive, intelligent, and reliable predictive maintenance systems for aircraft engine health management.

**Keywords:** predictive maintenance, BiLSTM, remaining useful life, deep learning, C-MAPSS

**Introduction.** Aircraft engines are among the most complex and critical components in modern aviation systems. Their continuous and reliable operation is crucial not only for passenger safety but also for the efficient execution of flight schedules. Any unexpected engine failure can result in significant technical losses and pose serious risks to human life. Therefore, the ability to predict failures in advance and plan maintenance activities accordingly has become a top priority in the aviation industry.

Traditional maintenance strategies, such as corrective (post-failure) and preventive (time-based) methods, often fall short in identifying hidden faults ahead of time or lead to the overuse of operational resources. Due to these limitations, recent years have witnessed a growing interest in data-driven, intelligent, and predictive maintenance approaches [1].

Advancements in artificial intelligence - especially in the field of deep learning - have opened new possibilities for smarter monitoring of industrial systems, including aircraft engines [2]. Among these technologies, Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) networks stand out for their ability to analyze multivariate sensor data presented in the form of time series, incorporating both past and future context. This capability makes them particularly effective in modeling the gradual progression of engine faults.

In this study, we propose a conceptual model architecture built upon BiLSTM networks. The goal is to theoretically justify and outline a practical approach for assessing the health condition of aircraft engines and estimating their Remaining Useful Life (RUL). The research examines the modeling potential of the NASA C-MAPSS dataset and provides a theoretical framework for future implementation and testing.

**Literature Review.** In recent years, the application of deep learning techniques in predictive maintenance has grown significantly [3]. Traditional statistical models such as ARIMA and linear regression often struggle to capture the nonlinear and time-dependent nature of engine degradation processes [4]. These models, while useful in simpler scenarios, fall short in handling the complex temporal dynamics typical of real-world aviation systems.

In contrast, Recurrent Neural Networks (RNNs), Long Short-Term Memory (LSTM), and their advanced variants are more adept at learning such intricate dependencies over time [5]. Among these, Bidirectional LSTM (BiLSTM) models preserve the strengths of traditional LSTM while enhancing them by processing data in both forward and backward temporal directions. This bidirectional capability makes BiLSTM particularly effective in time-series analysis, where understanding both past patterns and future trends is critical.

For example, one study demonstrated that a 1DCNN-BiLSTM architecture combined with the Convolutional Block Attention Module (CBAM) achieved high diagnostic accuracy in detecting engine faults [6]. Their model, tested on the C-MAPSS dataset, outperformed traditional approaches in predictive precision.

Similarly, a comparative study between LSTM and GRU models highlighted the superior ability of LSTM to retain long-term dependencies [7]. Their findings showed that LSTM-based models achieved lower Root Mean Square Error (RMSE) values when estimating Remaining Useful Life (RUL). A BiLSTM architecture integrated with edge computing, named SGBRT, was explored to enable real-time prediction in decentralized environments.

Hybrid models also feature prominently in the literature. For instance, a model combining 1D-CNN and BiLSTM layers with attention mechanisms has been proposed. This configuration allowed the system to capture both local signal variations and long-term degradation trends in a unified framework. Their work illustrates not only the strength of BiLSTM but also the added value of integrating it with other architectures.

In conclusion, BiLSTM models often outperform classical machine learning and other deep learning approaches in predictive maintenance scenarios. Their capacity to model complex time-series data with high accuracy makes them a powerful tool for planning more responsive, precise, and reliable maintenance strategies.

**Methods.** As part of this study, a conceptual approach is proposed for predicting failures in aircraft engines and optimizing maintenance operations, based on the Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) model. Since the paper is theoretical in nature, no empirical training or implementation of the model has been conducted. Instead, the architecture and operating principles are presented at a conceptual level.

The intended application environment for the proposed method is NASA's C-MAPSS (Commercial Modular Aero-Propulsion System Simulation) dataset, which is widely used and reflects realistic engine simulation scenarios [8]. This dataset contains multivariate sensor readings for each engine, capturing how the measurements evolve over time. Within the scope of the theoretical approach, the following steps are envisioned:

- *Preprocessing:* Sensor data is scaled using Min-Max normalization to ensure consistent input ranges;
- *Segmentation:* The time-series data is divided into temporal windows using the sliding window technique, forming structured input matrices;
- *RUL Labeling:* For each window, the Remaining Useful Life (RUL) is computed using the following formula [9]:

$$RUL_i = T_i - t \quad (1)$$

where  $RUL_i$  - Remaining Useful Life for the  $i$ -th unit,  $T_i$  - Total number of cycles until failure for the  $i$ -th unit,  $t$  - Current cycle or time step.

The overall conceptual structure of the proposed model is illustrated in Figure 1.

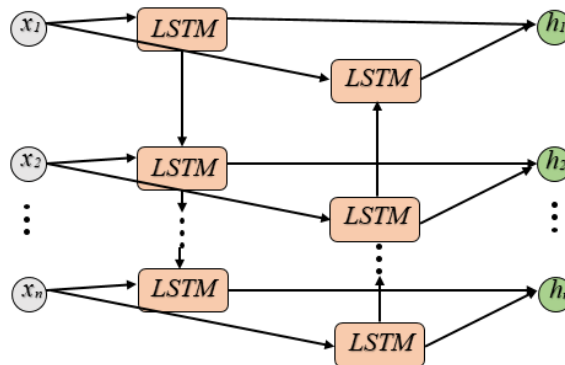


**Figure 1.** BiLSTM model architecture



The input sequence  $x_1, x_2, \dots, x_n$  is processed simultaneously in both forward and backward directions by parallel LSTM layers. The top layer captures information from past to future, while the bottom layer processes data from future to past. The resulting output vectors  $h_1, h_2, \dots, h_n$  are passed to subsequent layers and can be used for predicting the Remaining Useful Life (RUL) of aircraft engines.

The proposed BiLSTM model architecture comprises the following key components:

1. *Input Layer* – accepts time-ordered sequences of sensor data;
2. *Bidirectional BiLSTM Layer* – processes information in both forward and backward directions to capture long-term dependencies in the data;
3. *Fully Connected Output Layer* – produces the final Remaining Useful Life (RUL) prediction.

Although this study does not involve empirical training, it is theoretically assumed that the model could be trained using the Adam optimizer in combination with an early stopping strategy to prevent overfitting. Evaluation metrics such as Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and  $R^2$  (Coefficient of Determination) are considered appropriate for assessing performance. However, these metrics were not calculated in this work, as the model's structure is presented purely at a conceptual level.

The goal of this conceptual model is to provide a foundational framework for real-world applications. Future studies may involve practical experiments to evaluate and optimize the performance of the BiLSTM-based approach in operational environments.

**Results and discussion.** This section discusses the theoretical advantages of the proposed BiLSTM architecture within the context of predictive maintenance (PdM), as well as the expected outcomes based on existing literature. Since no empirical model training or testing was conducted in this study, the evaluation relies primarily on a review of published research and the potential applicability of the method.

Prior studies have shown that BiLSTM models, particularly when applied to complex multi-sensor datasets like NASA's C-MAPSS, outperform LSTM, GRU, CNN, and traditional machine learning algorithms in predicting Remaining Useful Life. The key strength of BiLSTM lies in its ability to model both short- and long-term dependencies simultaneously by processing data in both temporal directions. This makes it especially useful in scenarios where engine faults develop gradually over time.

Some research has explored hybrid architectures that combine BiLSTM layers with convolutional layers and attention mechanisms. For example, proposed a 1DCNN-BiLSTM-ATT model where the CNN captures localized variations in signals, while the BiLSTM models the broader temporal patterns, resulting in a synergistic effect. Such architectures have demonstrated lower RMSE values and higher  $R^2$  scores in RUL prediction tasks.

The proposed BiLSTM framework shows strong theoretical potential in this domain, particularly due to:

- Its ability to learn complex patterns and trends in time-series data;
- A flexible structure that can be adapted for real-time analysis;
- A scalable input format that allows integration of additional sensor data;
- The capacity for engine-specific training and adaptation.

That said, the model's true performance can only be assessed through actual training and testing on real or simulated datasets. Therefore, the insights presented in this paper serve as a theoretical basis and motivation for further exploration of BiLSTM applications in predictive maintenance systems.

**Conclusion.** This study introduces a conceptual approach based on BiLSTM neural networks for the early prediction of aircraft engine faults. Both the literature review and methodological

design highlight BiLSTM's suitability for modeling time-series sensor data in predictive maintenance scenarios. Although not empirically tested, the proposed architecture offers a promising foundation for future practical implementations, potentially contributing to more efficient and reliable maintenance systems in the aviation industry.

## References

1. IATA. (2022). *Digital Transformation in Aircraft Maintenance*. International Air Transport Association White Paper. Retrieved from <https://www.iata.org>
2. GE Aviation. (2020). *AI for predictive maintenance: Enabling intelligent decision-making for fleet operations*. Retrieved from <https://www.geaviation.com>
3. Zhao, R., Yan, R., Wang, J., Mao, K., Shen, F., & Wang, X. (2019). Deep learning and its applications to machine health monitoring: A survey. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050>
4. Babu, G. S., Zhao, P., & Li, X. L. (2016). Deep convolutional neural network-based regression approach for estimation of remaining useful life. *Proceedings of the International Conference on Database Systems for Advanced Applications*, 214–228. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32025-0\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32025-0_14)
5. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
6. Wu, J., Kong, L., Kang, S., Zuo, H., Yang, Y., & Cheng, Z. (2024). Aircraft Engine Fault Diagnosis Model Based on 1DCNN-BiLSTM with CBAM. *Sensors*, 24(3), 780. <https://doi.org/10.3390/s24030780>
7. Zhang, Y., Liu, Q., & Tan, H. (2020). Predictive maintenance in aircraft engines using deep learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(7), 4672–4680. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2978709>
8. National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2008). *C-MAPSS Jet Engine Simulated Data*. NASA Open Data Portal. Retrieved from <https://data.nasa.gov/dataset/cmapss-jet-engine-simulated-data>
9. Saxena, A., Goebel, K., Simon, D., & Eklund, N. (2008). Damage propagation modeling for aircraft engine run-to-failure simulation. *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/PHM.2008.4711414>

## TƏYYARƏ MÜHƏRRİKLƏRİNDƏ ERKƏN NASAZLIQ PROQNOZU ÜÇÜN BiLSTM-ƏSASLI KONSEPTUAL MODEL

Qurbanov M.H., Qurbanova G.H., Mustafalı T.K., Kərimzadə M.T., Hüseynzadə E.Ş.

**Xülasə.** Təyyarələrin texniki xidmətinin vaxtında və dəqiq planlaşdırılması uçuş təhlükəsizliyinin artırılması və istismar xərclərinin azaldılması baxımından mühüm rol oynayır. Təyyarə mühərrikləri aviasiyanın ən mürəkkəb və təhlükəsizlik baxımından ən kritik komponentlərindən biridir və nasazlıqların erkən aşkarlanması proqnozlaşdırıcı texniki xidmət (PTX) sistemlərinin əsas məqsədlərindən sayılır. Bu məqalədə mümkün nasazlıqların proqnozlaşdırılması və mühərrik texniki xidmət strategiyalarının optimallaşdırılması üçün Bi-directional Long Short-Term Memory (BiLSTM) neyron şəbəkələrinə əsaslanan nəzəri yanaşma təqdim olunur. Praktiki model öyrədilməsi aparılmasa da, tədqiqat BiLSTM əsaslı arxitekturanın konseptual quruluşunu təqdim edir və onun komponentlərini və nəzərdə tutulan funksiyalarını izah edir. NASA-nın C-MAPSS simulyasiya verilənlər bazası bu nəzəri model üçün istinad mühiti kimi

qəbul olunur. Təklif edilən metodologiya çoxölçülü sensor signallarının zaman pəncərələrinə bölünməsinə və hər bir seqmentin uyğun Qalan İstismar Müddəti (RUL) ilə etikətlənməsini əhatə edir. Performans göstəriciləri hesablanmasa da, struktur ədəbiyyatda daha əvvəl test edilmiş modellərlə uyğun şəkildə tərtib edilmiş və PTX tətbiqlərində geniş istifadə olunan məlumat hazırlama üsullarına əsaslanır. Ədəbiyyat icmalı BiLSTM modellərinin zaman sıralı analizlərdə, xüsusilə də aviasiya sistemlərində sağlamlıq monitorinqi və RUL proqnozlaşdırılması tapşırıqlarında aktuallığını təsdiqləyir. Bir sıra əvvəlki tədqiqatlar BiLSTM əsaslı arxitekturaların zamanla bağlı deqradasiya meyllərini öyrənməkdə ənənəvi maşın öyrənməsi metodlarını üstələdiyini göstərmişdir. Aydın konseptual çərçivə təqdim edən bu tədqiqat gələcəkdə real məlumatlarla aparılacaq empirik araşdırmalar, modelin öyrədilməsi və qiymətləndirilməsi üçün əsas yaradır. Nəticələrin, təyyarə mühərriklərinin sağlamlığının monitorinqi sahəsində daha ağıllı, adaptiv və etibarlı PTX sistemlərinin inkişafını dəstəkləyəcəyi gözlənilir.

**Açar sözlər:** proqnozlaşdırıcı texniki xidmət, BiLSTM, qalan istismar müddəti, dərin öyrənmə, C-MAPSS

## ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED PREDICTIVE CONTROL FOR ANTI-ICING OF AIR DATA PROBES IN AVIATION



**Guliyev R.R.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
rauf.guliyev@naa.edu.az

**Abstract.** Accurate airspeed measurement is essential for flight control, navigation, and overall reliability in modern aircraft systems. Aircraft use pitot-static systems based on the Bernoulli principle: airspeed is derived from the difference between total (pitot) and static pressure. However, pitot tubes are exposed to the environment and are highly susceptible to hazards such as icing. When ice accumulates and blocks the pitot tube, the measured total pressure becomes unreliable, leading to erroneous or frozen airspeed indications. Such failures have been identified as contributing factors in several aviation accidents.

This study presents a MATLAB/Simulink model that simulates the behavior of the air data system under both nominal and faulty (iced) conditions. The model generates dynamic total-pressure signals using a ramp input to emulate increasing airspeed. A logical switch introduces a blockage event to mimic pitot-tube icing by replacing the input with a fixed value. Airspeed is computed using the Bernoulli equation and compared against a reference (true) airspeed signal. The results show a divergence between the reference and measured airspeed after the simulated blockage, indicating a sensor-failure risk.

The simulation outputs provide a basis for applying artificial-intelligence methods—such as anomaly detection or reinforcement learning—to detect and mitigate pitot-tube failures in real time. Using datasets generated from the simulation, AI models can be trained to recognize abnormal airspeed behavior, offering potential for predictive maintenance and improved flight safety in future air data systems.

**Keywords:** pitot tube, airspeed measurement, icing, air data system, Simulink simulation, artificial intelligence, fault detection

**Introduction.** Practically, every aircraft has a pitot and static system with sensors which detect the ambient pressure. The pitot tubes are detecting total pressure, while static pressure detects static pressure. By having this essential air data, it is possible to calculate the airspeed, vertical speed, altitude and other critical parameters of an aircraft during flight, which is based on Bernoulli's principle [1]. The system consists of a pitot tube (measuring total pressure,  $P_t$ ) and static ports (measuring static pressure,  $P_s$ ). The airspeed  $V$  is calculated from the difference between these pressures using the equation

$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \quad (1)$$

where  $\rho$  the air density [2]. This dynamic pressure approach is simple, robust, and widely implemented in aircraft from light general aviation planes to modern commercial airliners.

In modern aircraft, such as the Airbus A320, A350 and Boeing 787 Dreamliner, Boeing 737max and other, the air data measurement is provided by highly advanced and integrated systems [3, 4]. These aircraft use the Air Data Inertial Reference System (ADIRS), which comprises in itself two systems:

- Air Data System (ADS): This system processes measurements from pitot tubes, static ports, and temperature sensors to provide parameters such as airspeed, Mach number, altitude, and angle of attack by using angle of attack probes (AOA).
- Inertial Reference System (IRS): This system has gyroscopes and accelerometers, which are used to calculate the aircraft attitude, angular rate, and position data (pitch, yaw, roll, and acceleration vectors).

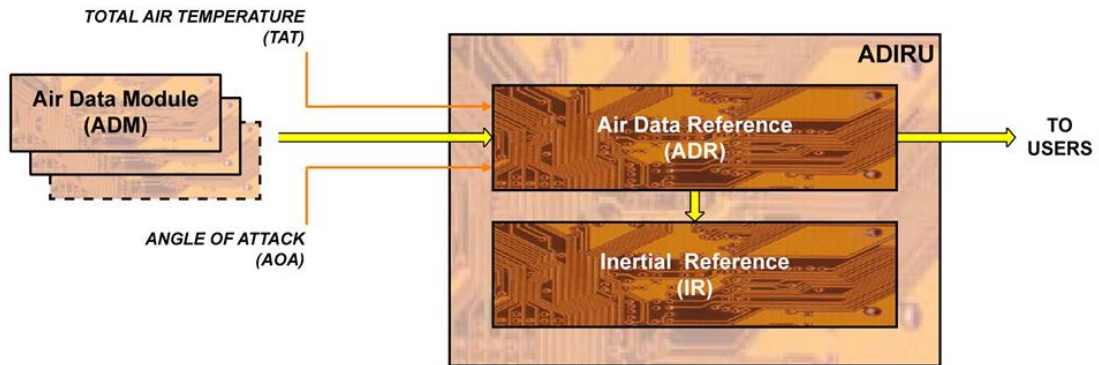


**Figure 12.** ADIRU: Air Data/Inertial Reference Unit of A320 [5]

The Figure 1 represents ADIRU of an Airbus A320. The aircraft has three units in one ADIRS system. Air Data Module (ADM) is an essential sensor interface unit responsible for converting raw pneumatic data—such as total pressure, static pressure, total air temperature (TAT), and angle of attack (AOA)—into digital signals, these all measurements are received from external sensors including pitot tubes, static ports, and temperature probes located on the aircraft's fuselage [2].

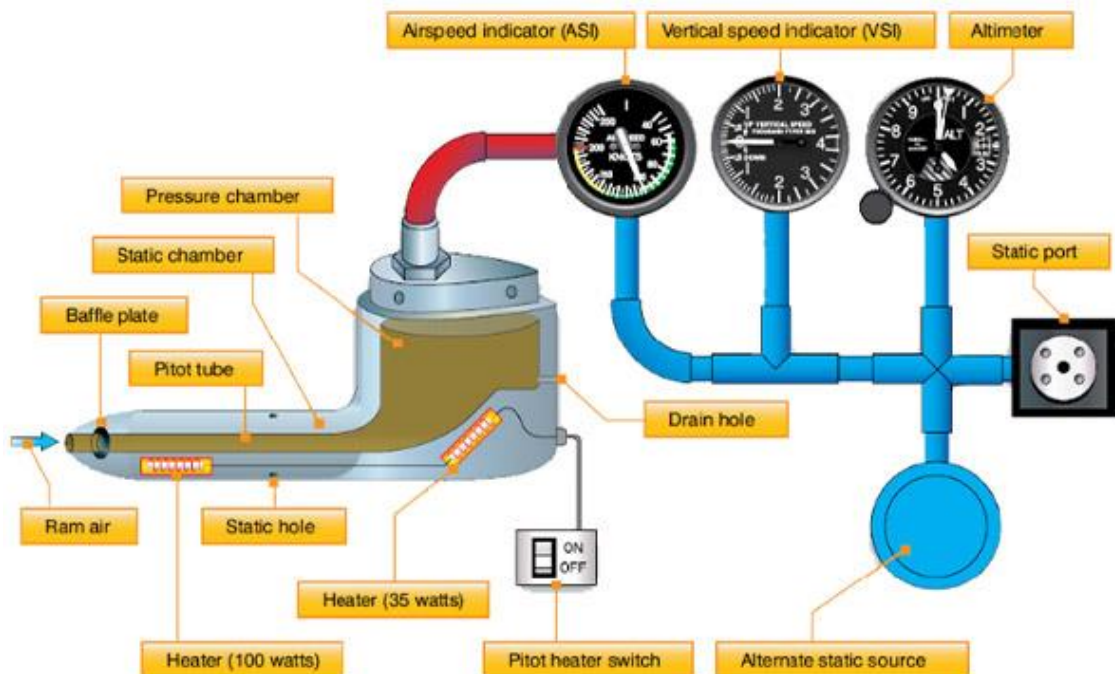


**Figure 13.** Fundamental structure and overview of Pitot Tube [6]

As shown in Figure 2, pitot tube plays a huge role in measuring critical data such as airspeed, the pitot tube's position is always similar to the flight path. Because of its location, device is very sensitive to environmental hazards such as icing, which can block the probe and result in incorrect



or missing pressure readings. This paper will investigate this failure mode and simulate its impact, understanding how the ice formation can be detected by using Artificial Intelligence (AI) to prevent it in advance.



**Figure 14.** Iced-surfaced pitot tube [7]

As shown in Figure 3, the pitot tube is visibly obstructed by ice accumulation, when such a blockage occurs, the device can no longer measure total pressure precisely, which leads to erroneous airspeed indications. In modern aircraft, airspeed data is critical not only for pilot decision-making but also for flight control computers and automated systems, and that is why a frozen pitot tube can result in sudden airspeed loss or spurious readings, potentially triggering stall warnings, overspeed alerts, or autopilot disengagements. Historical incidents, such as the crash of Air France Flight 447 in 2009, have demonstrated that pitot icing can contribute to loss of situational awareness and aircraft control, particularly when crews receive conflicting or unreliable data [8].

**Methods.** This simulation is also a first step toward using AI to detect failures in air data systems, model helps create example data that shows how airspeed behaves normally and during a pitot tube icing event. In the future, this kind of data can be used to train AI systems that automatically recognize when the pitot tube is blocked or giving wrong values, improving flight safety.

To investigate the impact of pitot tube icing on airspeed measurement, a MATLAB/Simulink model was developed to simulate a simplified air data system. The simulation mimics a basic pitot-static configuration, where airspeed is derived from the difference between total and static pressure using the Bernoulli equation (1).

**Simulink Model Description.** The model consists of the following key elements:

- Pitot Module (Calculates total pressure based on an input airspeed, using a fixed static pressure and air density);
- Step Input (A step block simulates an environmental change, representing the moment when icing occurs and total pressure data becomes invalid);
- Switch Logic (A logical switch compares a step function to simulate the transition into icing conditions. Before icing, the model uses computed dynamic pressure; after icing, a faulty fixed pressure value is substituted);
- Airspeed Estimation Module (Receives total and static pressure along with air density and calculates the measured airspeed using the Bernoulli formula. This module is implemented as a MATLAB Function block).

**Icing Simulation.** To show the blocked pitot tube because of the icing, the model replaces the actual dynamic pressure with a constant incorrect pressure after some simulation time (e.g., 5 seconds). In this case, simulation represents the loss or freezing of dynamic pressure input, leading to incorrect airspeed readings.

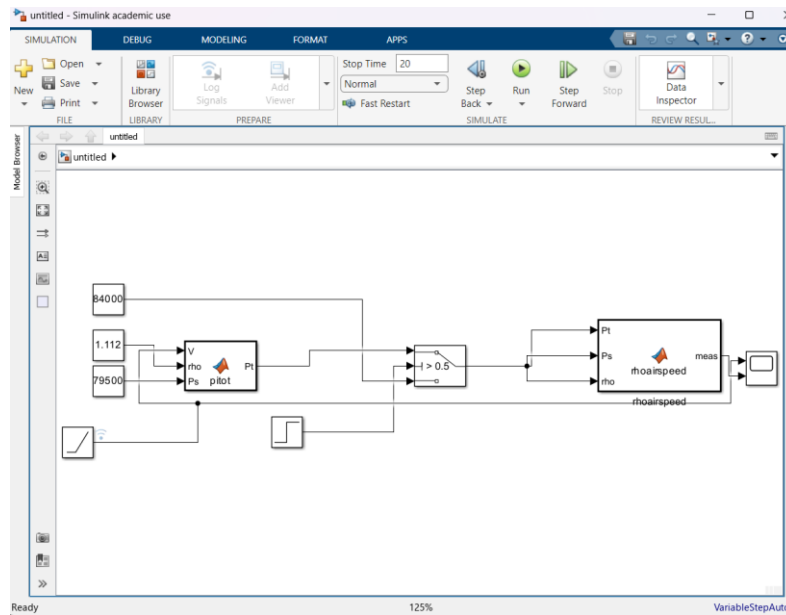


**Figure 15.** The impact of pitot tube icing on observed airspeed is simulated using a Simulink model

Table 1  
Parameters used

| Parameter          | Value      | Unit              |
|--------------------|------------|-------------------|
| Static pressure    | 79,500     | Pa                |
| Air density        | 1.112      | kg/m <sup>3</sup> |
| Simulated airspeed | Ramp: 0–20 | m/s               |
| Icing time onset   | 5          | seconds           |

The parameters used in the simulation are summarized in Table 1, simulation was run for 20 seconds with a sample time of 1 second to clearly observe the effect before and after the simulated pitot tube blockage.

**Results and discussion.** To show how the airspeed measurements inaccurate because of the pitot tube icing, simple Simulink model was created. During simulation, a linear increase in true airspeed over time was assumed, for example, at a specific time, when ( $t = 5$  s), icing is simulated by fixing the total pressure input, mimicking a blocked pitot tube.

In result, the measured airspeed no longer reflects the actual acceleration of the aircraft. This behavior is visualized in Figure 5, where the yellow line illustrates the increasing true airspeed, at the same time orange line (measured airspeed) stays constant after icing start. The crucial risk posed by undetected pitot icing is made clear by this difference, as it might result in inaccurate air data that flight control or navigation systems depend on.

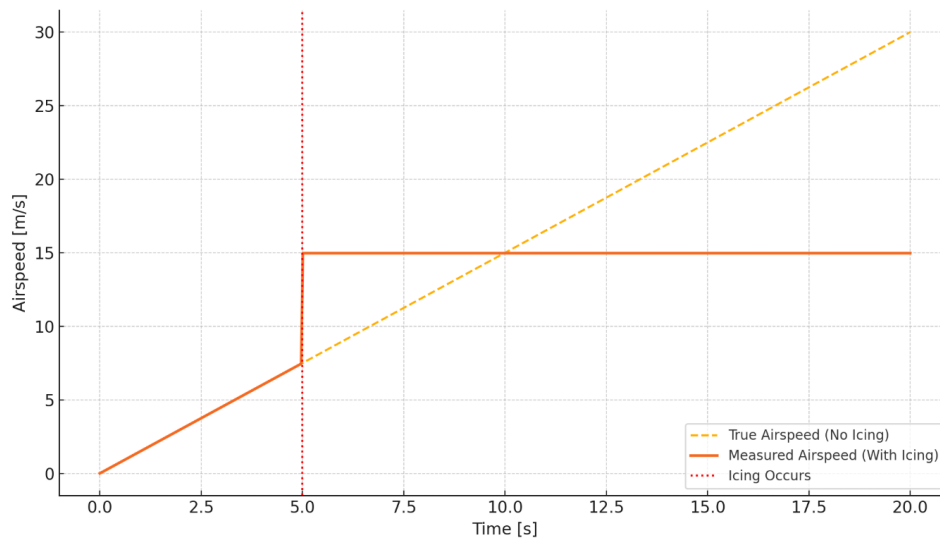


**Figure 16.** Simulated effect of pitot tube icing on measured airspeed. Before icing ( $t < 5s$ ), measured airspeed follows the true airspeed. After icing, the measured value becomes frozen, misrepresenting actual acceleration.

**Conclusion.** This paper, simple structure of air data system on modern aircraft, and the impact of the icing on pitot tube and airspeed measurements, and how such failures can be modeled and visualized using MATLAB/Simulink were shown. These results show that icing can lead to very dangerous situations during flight because of inaccurate measurements, and paper suggests a use of Artificial Intelligence in future for detection and prediction of ice formation on air data probes, for guaranteeing safe flight. Also, work provides useful outputs for AI development. In the future, machine learning algorithms—such as decision trees, support vector machines, or neural networks—can be trained using this data to detect or even predict pitot tube faults.

## References

1. Benson, T. (n.d.). *Airplane: Pitot*. NASA Glenn Research Center. Retrieved June 26, 2025, from <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/pitot.html>
2. Collinson, R. (2011). Air data and air data systems. In *Introduction to avionics systems* (pp. 377–413). Springer.
3. Boeing. (2010). *787 training student lab notebook: Navigation systems* (Avionics Book 4 of 5). Boeing.
4. SR Technics. (2004, June). *A320 family training manual: Airframe & powerplant/Electro/Avionics (Level 3)*. Airbus.
5. Airbus. (2004). *Technical training manual: Maintenance course—T1 & T2 navigation*. Airbus.
6. ATEQ Aviation. (2025). *Air data testing applications*. <https://www.ateq-aviation.com/air-data-testing/>
7. Jäckel, R., Gutiérrez-Urueta, G., & Tapia, F. (2021). A review on Pitot tube icing in aeronautics: Research–design and characterization–future trends. *Flow Measurement and Instrumentation*, 81, 102033. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102033>
8. Aviation Safety Network. (2015). *Accident description (Entry 321502)*. Retrieved June 26, 2025, <https://asn.flightsafety.org/asndb/321502>

## AVIASİYADA HAVA MƏLUMAT ZONDLARININ BUZLANMASININ QARŞISININ ALINMASI ÜÇÜN SÜNİ İNTELLEKTƏ ƏSASLANAN PROQNOZLAŞDIRICI İDARƏETMƏ

Quliyev R.R.

**Xülasə.** Müasir təyyarələrdə uçuşa nəzarət, naviqasiya və təhlükəsizlik üçün etibarlı hava sürətinin ölçülməsi vacibdir. Əksər təyyarələr Bernoulli prinsipi əsasında hava sürətini hesablamaq üçün pitot-statik sistemlərdən istifadə edir, burada ümumi və statik təzyiq arasındakı fərq dinamik təzyiqi və deməli, hava axınının sürətini müəyyən edir. Bununla belə, pitot boruları xarici şəraitə məruz qalır və buzlanma kimi ətraf mühit təhlükələrinə çox həssasdır. Buz yığıldıqda və pitot borusunu bağladıqda, ölçülmüş ümumi təzyiq etibarsız olur, nəticədə səhv və ya donmuş hava sürəti oxunuşları olur. Bu cür uğursuzluqlar bir sıra aviasiya qəzalarına səbəb olan amillər kimi müəyyən edilmişdir.

Bu tədqiqat həm normal, həm də nasaz (buzlu) şəraitdə hava məlumat sisteminin davranışını simulyasiya edən MATLAB/Simulink modelini təqdim edir. Model artan hava sürətini simulyasiya etmək üçün geniş girişindən istifadə edərək dinamik ümumi təzyiq dəyərləri yaradır. Məntiqi keçid pitot borusunun buzlanmasını təkrarlamaq üçün təzyiq signalını sabit dəyərlə əvəz edərək tıxanma hadisəsini təqdim edir. Nəticədə alınan hava sürəti Bernoulli tənliyi ilə hesablanır və həqiqi hava sürəti signalı ilə müqayisə edilir. Nəticələr imitasiya edilmiş buzlanma hadisəsindən sonra həqiqi və ölçülmüş hava sürəti arasında əhəmiyyətli fərqi göstərir və aşkar edilməmiş sensor nasazlığı riskini nümayiş etdirir.

Simulyasiyadan başqa, çıxış məlumatları real vaxtda pitot borusu nasazlıqlarını müəyyən etmək üçün anomaliyaların aşkarlanması və ya nəzarət edilən öyrənmə kimi süni intellekt (AI) üsullarının tətbiqi üçün əsas yaradır. Simulyasiya əsasında yaradılan məlumat dəstlərindən istifadə etməklə, süni intellekt modelləri anormal hava sürəti nümunələrini erkən aşkar etmək üçün öyrədilə bilər və gələcək hava məlumat sistemlərində proqnozlaşdırılan texniki xidmət və təkmilləşdirilmiş uçuş təhlükəsizliyi üçün potensial təklif edir.

**Açar sözlər:** pitot borusu, hava sürətinin ölçülməsi, buzlanma, hava məlumat sistemi, Simulink simulyasiyası, süni intellekt, nasazlığın aşkarlanması

## AVIASIYA SİSTEMLƏRİNDƏ SÜNİİNTELLEKT



**Məmmədova M.İ.**

Azərbaycan Universiteti, Bakı, Azərbaycan  
maryam.mammadova.97@mail.ru

**Xülasə.** Bu məqalədə, süni intellektin aviasiyada tətbiqi və onun bu sahədə çoxşaxəli istifadəsi zamanı effektivliyi və səmərəliliyi vurğulanmışdır. Bu məqalənin məqsədi süni intellekt texnologiyalarının aviasiya sənayesindəki funksional rolunu müəyyənləşdirmək və onların səmərəliliyinin artırılması istiqamətində mümkün həll yollarını irəli sürməkdən ibarətdir.

Araşdırmalar bunu göstərir ki, süni intellekt aviasiya texnologiyalarını optimallaşdırması sayəsində bu texnologiya uçuş sistemlərini nəzarətdə saxlayır və texniki nasazlıqlar barədə öncədən məlumat verir. Bundan əlavə, hava məkanında yüzlərlə təyyarənin hərəkətini eyni vaxtda nəzarətdə saxlayır və həmçinin pilot hazırlığında uçuş şəraitini imitasiya edərək təlimdə əldə olunan bilik və bacarıqların keyfiyyətini artırır.

Tədqiqatda həmçinin süni intellektin tətbiqi zamanı ortaya çıxan texnoloji, hüquqi və mənəvi çağırışlar da qeyd edilmişdir. Sistemlərin optimal istifadəsini təmin etmək üçün dövlət və özəl sektorların əməkdaşlığı, hüquqi-normativ bazanın yaradılması və peşəkar heyətin təlimi vacib hesab olunur. Bu kontekstdə, süni intellektin aviasiya sahəsindəki rolu təkcə texniki və iqtisadi baxımdan deyil, həm də sosial, ekoloji və etik ölçülərdə əhəmiyyət daşıyır.

Məqalədə süni intellektin integrasiyası zamanı əldə edilmiş üstünlüklərə və çağırışlara da yer ayrılmışdır. Yekunda süni intellektin aviasiya sahəsində effektivliyi sübut olunmuş və onun gələcəkdə səmərəli tətbiqi üçün konkret təkliflər irəli sürülmüşdür.

**Açar sözlər:** aviasiya, süni intellekt, effektivlik, səmərəlilik, uçuş təhlükəsizliyi

**Giriş.** Müasir dövrdə aviasiya sənayesi qloballaşan dünyanın inkişafına müsbət təsir göstərir. Hava nəqliyyatı ticari əlaqələri gücləndirir, turizmin inkişafında əvəzsiz rol oynayır, insanların həyat standartlarını yaxşılaşdırır və iş yerləri ilə təmin edir. Son dövrə aid texnologiyalar aviasiya sahəsində radikal dəyişikliklər formalaşdırmışdır [1,5]. GPS əsaslı naviqasiya və ağıllı sistemlərin tətbiqi uçuşların dəqiqliyini və təhlükəsizliyini artırmışdır [1,5]. Süni intellektin aviasiyaya integrasiyası isə bu dəyişikliklərin ən mühüm mərhələsi hesab olunur [1,5]. Çünki AI alqoritmləri həm təyyarələrin texniki vəziyyətini izləmək, həm də uçuş marşrutlarını optimallaşdırmaq baxımından vacib imkanlar yaradır [1,5]. Məsələn, böyük aviasiya şirkətləri mühərriklərin iş rejimini real vaxtda təhlil edərək nasazlıqları öncədən müəyyənləşdirir ki, bu da qəza risklərini azaldır və texniki xidmət xərclərini minimuma endirir [1,5].

Bundan əlavə, süni intellekt pilotların hazırlığında geniş istifadə olunur. Simulyatorlar real uçuş şəraitini imitasiya edir və təlim prosesini daha təhlükəsiz və effektiv edir [2,5]. Hava məkanında yüzlərlə təyyarənin hərəkətinin eyni vaxtda idarə olunması isə yalnız bu texnologiya vasitəsilə mümkündür [1,5]. Müasir aviasiya sistemləri sürətlə rəqəmsallaşır və bu sahədəki yeniliklər hava nəqliyyatının idarə edilməsində yeni perspektivlər yaradır. Süni intellekt yalnız uçuşların təhlükəsizliyini artırmır, həm də əməliyyatların məhsuldarlığını gücləndirir, maddi və texniki imkanların səmərəli idarəsi üçün şərait yaradır [1,2]. AI texnologiyaları vasitəsilə uçuş marşrutları məqsədyönlü şəkildə qurulur, texniki nasazlıqlar öncədən müəyyən edilir və insan səhvləri minimal səviyyəyə endirilir [1,4]. Nəticə etibarilə bu araşdırma aviasiya sistemindəki funksional rolunu, təqdim etdiyi faydaları və gələcəkdə daha səmərəli tətbiq üçün mümkün yolları göstərməyi nəzərdə tutur [1,5].



Buna əlavə olaraq, süni intellektin aviasiya sahəsində istifadəsi yalnız texniki əməliyyatlarla məhdudlaşmır [1,2]. AI sistemləri eyni zamanda uçuş planlaşdırmasının təkmilləşdirilməsi, hava yollarının logistika idarəsi və səyahət xidmətlərinin fərdiləşdirilməsi kimi sahələrdə də vacib rol oynayır [3,4]. Nümunə olaraq, süni intellekt alqoritmləri real vaxt məlumatlarını təhlil edərək hava şəraiti, tıxac və yanacaq istehlakı kimi parametrləri nəzərə alaraq marşrutları dinamik şəkildə dəyişdirə bilər [1,5]. Bu isə yalnız uçuşların təhlükəsizliyini artırmaqla kifayətlənmir, həm də əməliyyat xərclərinin minimuma endirilməsi və resursların daha səmərəli istifadəsinə imkan yaradır [2,5]. Eyni zamanda, AI pilotların və texniki heyətin peşə bacarıqlarının təkmilləşdirilməsi üçün interaktiv simulyatorlar və təlim proqramları ilə birləşdirilərək daha keyfiyyətli təhsil prosesinə kömək edir [1,2].

Hazırkı zamanda aviasiya sənayesinin sürətlə rəqəmsallaşması və məlumatların böyük miqdarda emalına ehtiyacı süni intellektin istifadəsini zəruri edir [1,4]. Bu texnologiya yalnız operativ qərarvermə proseslərini sürətləndirmir, həm də insan faktorundan doğan səhvləri minimuma endirir [2,5]. Nəticədə, AI aviasiya əməliyyatlarının təhlükəsizliyini, səmərəliliyini və davamlı inkişafını təmin edən əsas strateji vasitələrdən birinə çevrilir [1,3,4].

**Metodlar.** Bu məqalə analitik və müqayisəli metodlar əsasında hazırlanmışdır. Araşdırma prosesi müxtəlif elmi mənbələrdən, o cümlədən elmi məqalələr, hesabatlar, beynəlxalq təşkilatların sənədləri və statistik məlumatlardan istifadə etməklə həyata keçirilmişdir [1-3,5]. Toplanmış məlumatlar sistemli şəkildə təhlil edilmiş, süni intellektin aviasiya sahəsində tətbiqi, verdiyi üstünlüklər və yaranan çağırışlar qiymətləndirilmişdir [1,5]. Bundan əlavə, AI texnologiyalarının funksional rolu və əməliyyat səmərəliliyinə təsiri müqayisəli yanaşma ilə araşdırılmış, fərqli tədqiqat nəticələri bir-biri ilə əlaqələndirilmişdir [1,2,4]. Bu yanaşma tədqiqatın nəticələrinin etibarlılığını artırmış və gələcəkdə süni intellektin aviasiya sistemlərində səmərəli tətbiqi üçün tövsiyələrin hazırlanmasına imkan yaratmışdır [1,3,5].

**Nəticə və müzakirələr.** Yeni bir mərhələnin başlanğıcı sayılan süni intellektin aviasiya sistemlərinə inteqrasiyası uçuş sənayesinin idarə edilməsində effektiv rol oynayır [1,5]. Texniki xidmətin səmərələşdirilməsi, uçuş təhlükəsizliyi və pilot təliminin inkişaf etdirilməsi sahələrində süni intellektin verdiyi töhfələr açıq şəkildə görünür [1,5]. Həmçinin idarəetmə qərarlarının avtomatlaşdırılması və insan faktoruna olan ehtiyacın zəifləməsi əməliyyat səmərəliliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır [2,4]. Lakin bəzi texnoloji və mənəvi maneələr, yüksək maliyyə və hüquqi öhdəlik məsələləri bu sahənin qarşısında duran əsas çağırışlardır [2,4]. Yekunda süni intellekt aviasiyanın perspektiv yönümlü yüksəlişində vacib mövqe tutacaq əsas rəqəmsal alət olaraq çıxış edir [4].

Əlavə olaraq, süni intellekt yalnız texniki sahələrdə deyil, həm də sərnəşin təcrübəsinin yaxşılaşdırılmasında əhəmiyyətli nəticələr vəd edir [3]. Avtomatlaşdırılmış xidmətlər, fərdiləşdirilmiş səyahət planları və süni intellekt əsasında fəaliyyət göstərən müştəri dəstək sistemləri sərnəşinlərin məmnunluğunu artırır [3]. Bu isə hava yolları şirkətlərinə bazarda daha güclü rəqabət üstünlüyü qazandırır [3,4].

Eyni zamanda, ekoloji davamlılıq məsələləri də süni intellektin tətbiqi ilə sıx bağlıdır [2]. Uçuş marşrutlarının optimallaşdırılması nəticəsində yanacaq sərfiyyatının azalması karbon emissiyalarını əhəmiyyətli dərəcədə aşağı salır [2]. Bu isə beynəlxalq təşkilatların davamlı inkişaf məqsədlərinə uyğun olaraq aviasiyanın daha ekoloji və "yaşıl" gələcəyə doğru addımlamasına şərait yaradır [2].

Maraqlı məqam ondan ibarətdir ki, süni intellektin tətbiqi yalnız böyük beynəlxalq şirkətlər üçün deyil, həm də regional aviaşirkətlər və hava limanları üçün mühüm faydalar gətirə bilər [5]. Çünki kiçik aviasiya qurumları süni intellekt texnologiyalarından istifadə etməklə resurslarını daha səmərəli idarə edə əməliyyat xərclərini azalda və xidmət keyfiyyətini yüksəldə bilərlər [5].

Həmçinin, süni intellekt hava limanlarının əməliyyatlarının effektivləşdirilməsində və resurs

idarəçiliyində də mühüm rol oynayır [1,5]. AI alqoritmləri uçuş cədvəllərini və terminal fəaliyyətlərini real vaxtda izləyərək gecikmələrin və tıxacların qarşısını almağa imkan yaradır [1,5]. Bu texnologiya həmçinin təhlükəsizlik protokollarının avtomatlaşdırılmasını təmin edir və fəvqəladə hallar zamanı qərarverməni sürətləndirir [2,4]. Üstəlik, süni intellekt təlim və öyrənmə proseslərini fərdiləşdirərək pilotların və texniki heyətin bacarıqlarını artırır [2,5]. Nəticədə, AI-nin istifadəsi yalnız əməliyyat səmərəliliyini artırmaqla qalmır, həm də aviasiyanın ümumi strateji inkişafına töhfə verir [1-5].

Bütün bunlar göstərir ki, süni intellektin tətbiqi təkcə texniki və iqtisadi baxımdan deyil, həm də sosial, ekoloji və etik ölçülərdə aviasiya sənayesinin gələcəyini müəyyən edən əsas vasitələrdən biridir. Bu baxımdan, gələcək tədqiqatların və dövlət-özəl əməkdaşlığının əsas istiqaməti süni intellektin mövcud potensialını tam şəkildə reallaşdırmaqdan ibarət olacaq.

Süni intellektin aviasiya sistemlərinə tətbiqi ilə bağlı əldə olunmuş nəticələrdən aydın olur ki, bu texnologiya artıq ənənəvi idarəetmə üsullarını kölgədə qoyur və yeni mərhələyə yol açır. Əgər əvvəllər uçuşların təhlükəsizliyi pilotların diqqətindən və texniki heyətin mütəmadi nəzarətindən asılı idisə, bu gün süni intellekt texnologiyaları həm texniki nasazlıqları öncədən müəyyən edir, həm də uçuş marşrutlarını real vaxt rejimində tənzimləyərək qəza risklərini minimum həddə çatdırır. Mənim fikrimcə, bu, təkcə texniki tərəqqi deyil, həm də aviasiya sənayesinin gələcəyinə baxış bucağını dəyişdirən əsas faktordur. Çünki burada insan faktoru ilə texnologiya arasında yeni bir balans formalaşır.

Digər vacib məqam pilot hazırlığı ilə bağlıdır. Daha əvvəl təlim prosesində nəzəri biliklərin praktikaya tətbiqi kifayət qədər məhdud idi və çox vaxt riskləri özündə ehtiva edirdi. Süni intellekt əsaslı simulyatorların istifadəsi isə bu çatışmazlıqları aradan qaldıraraq real uçuş şəraitinə maksimal yaxın mühit yaradır. Bu mənim üçün o deməkdir ki, gələcəkdə pilotların hazırlıq səviyyəsi daha obyektiv, daha çevik və təhlükəsiz olacaq. Ənənəvi təlim metodları ilə müqayisədə, AI müxtəlif ekstremal vəziyyətlərin sınaqlarına imkan verir ki, bu da təcrübənin keyfiyyətini əhəmiyyətli dərəcədə artırır.

Süni intellektin faydası yalnız texniki və tədris sahələrində deyil, həm də səfərlərin səyahət təcrübəsində açıq aydın görünür. Mənim müşahidəmə görə, fərdiləşdirilmiş xidmətlər, avtomatlaşdırılmış müştəri dəstəyi və optimal uçuş planları səfərlərin məmnunluğunu artırmaqla yanaşı, aviaşirkətlər üçün də bazar rəqabətində üstünlük yaradır. Bu, artıq aviasiya şirkətlərinin yalnız uçuş təhlükəsizliyinə deyil, həm də səfərlərin rahatlığına daha çox diqqət ayırdığını göstərir. Belə yanaşma həm iqtisadi, həm də sosial baxımdan mühüm nəticələrə gətirib çıxarır.

Digər tərəfdən, mən hesab edirəm ki, süni intellektin tətbiqi ekoloji davamlılıq baxımından da həlledici əhəmiyyətə malikdir. Uçuş marşrutlarının optimallaşdırılması nəticəsində yanacaq istehlakının minimuma endirilməsi təkcə maliyyə baxımından fayda demək deyil həm də karbon emissiyalarının azaldılması deməkdir. Bu isə həm beynəlxalq təşkilatların davamlı inkişaf məqsədlərinə, həm də gələcək nəsillərə daha sağlam mühit buraxmaq öhdəliyinə uyğundur.

Ümumilikdə, süni intellektin aviasiya sənayesində istifadəsi mənim nəzərimdə yalnız bir texnoloji yenilik deyil, həm də strateji inkişafın əsas hərəkətverici qüvvəsidir. Əlbəttə, bu prosesin qarşısında hüquqi, etik və maliyyə çətinlikləri dayanır, lakin bunlar həllini tapdıqca AI-nin imkanları daha geniş şəkildə istifadə olunacaq. Mənim şəxsi qənaətim budur ki, dövlət və özəl sektorun əməkdaşlığı gücləndikcə, normativ-hüquqi baza təkmilləşdikcə və peşəkar kadr hazırlığına daha çox diqqət ayrıldıqca süni intellekt aviasiyanın həm texniki, həm iqtisadi, həm də sosial inkişafında aparıcı rol oynayacaq. Gələcəkdə bu texnologiyanın tətbiqi təkcə uçuşların təhlükəsizliyini artırmayacaq, həm də bütövlükdə aviasiya sənayesini daha rəqabətqabiliyyətli və davamlı inkişaf edən sahəyə çevirəcəkdir.

**Təkliflər.** Məqalədə əldə olunan nəticələr süni intellektin aviasiya sənayesinə verdiyi müsbət təsirlərlə yanaşı, müəyyən çağırışları da aydın şəkildə ortaya qoyur. Bu çağırışların aradan

qaldırılması və mövcud potensialdan maksimum faydalanma üçün bir sıra təkliflər təqdim olunur.

- Aviasiya sahəsində süni intellektin genişmiqyaslı tətbiqi üçün dövlət və özəl sektorlar birgə fəaliyyət göstərməlidir [2,4];
- Pilotlar və texniki heyət üçün texnoloji sistemlərlə işləməyə uyğunlaşdırılmış peşə inkişafı və tədris planları həyata keçirilməlidir [1,5];
- Mənəvi öhdəlik, normativ strukturlar dəqiq formada müəyyən edilməli və süni intellekt sistemlərinin idarəetmədəki rolu hüquqi baxımdan formalaşdırılmalıdır [2];
- Daxili və xarici miqyasda süni intellekt texnologiyalarının tətbiqini inkişaf etdirən elmi-tədqiqat layihələri dəstəklənməlidir [3,5].

### Ədəbiyyat

1. Russell, S., & Norvig, P. (2020). Artificial intelligence: A modern approach (3rd ed.). Pearson Education.
2. International Civil Aviation Organization (ICAO). (2022). Artificial intelligence in aviation: Opportunities and challenges.  
<https://www.icao.int>
3. Airbus. (2020). How AI is shaping the future of flight.  
<https://www.airbus.com>
4. Boeing. (2021). Future of AI in commercial aviation.  
<https://www.boeing.com>
5. Chen, Y., Zhang, Q., & Li, H. (2020). Machine learning for flight safety: Applications and trends. Aerospace Science and Technology, 104, 105996.  
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105996>

## ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AVIATION SYSTEMS

Mammadova M.I.

**Abstract.** *This paper highlights the application of artificial intelligence (AI) in aviation and emphasizes its efficiency and effectiveness in various areas of the industry. The main aim of the study is to identify the functional role of AI technologies in the aviation sector and to propose potential solutions to enhance their overall efficiency.*

*Research indicates that AI optimizes aviation technologies by monitoring flight systems and providing early warnings of technical malfunctions. Additionally, it can simultaneously manage the movements of hundreds of aircraft in the airspace and improve pilot training by simulating flight conditions, thereby enhancing the quality of acquired knowledge and skills.*

*The study also addresses technological, legal, and ethical challenges that arise during the implementation of AI. Ensuring the effective use of these systems requires collaboration between public and private sectors, the establishment of normative legal frameworks, and the professional training of personnel. In this context, the role of AI in aviation is significant not only from a technical and economic perspective but also in social, environmental, and ethical dimensions.*

*The paper further discusses the advantages and challenges of AI integration. In conclusion, the effectiveness of AI in aviation is demonstrated, and specific recommendations are proposed for its efficient implementation in the future.*

**Keywords:** artificial intelligence, aviation, efficiency, optimization, pilot training

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ АВАРИЙНЫХ РАДИОМАЯКОВ ELT В АВИАЦИИ



**Асадов Э.З.**

Национальная Академия Авиации, г. Баку, Азербайджан  
elnur.asadov@naa.edu.az



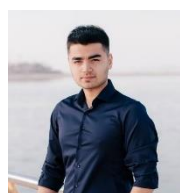
**Гасанлы Г.М.**

Национальная Академия Авиации, г. Баку, Азербайджан  
ghasanli@naa.edu.az



**Садыгов Г.Э.**

Национальная Академия Авиации, г. Баку, Азербайджан  
gsadigov@naa.edu.az



**Гулиев Р.Р.**

Национальная Академия Авиации, г. Баку, Азербайджан  
rauf.quliyev@naa.edu.az

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность интеграции технологий искусственного интеллекта (ИИ) в систему аварийных радиомаяков ELT (Emergency Locator Transmitter) для повышения эффективности обнаружения и идентификации воздушных судов при аварийных ситуациях. Предложен интеллектуальный модуль анализа и обработки сигналов, а также методы оптимизации работы радиомаяка с использованием алгоритмов машинного обучения. Проведён сравнительный анализ традиционных и интеллектуальных подходов, представлены результаты моделирования и рекомендации по дальнейшему внедрению.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, авиация, аварийный радиомаяк, ELT, машинное обучение, радионавигация, поиск и спасение.

**Введение.** Современные авиационные системы безопасности требуют высокой надёжности и оперативности обнаружения воздушных судов, потерпевших бедствие. Аварийные радиомаяки ELT занимают ключевое место в поисково-спасательных операциях. Однако, несмотря на развитие технологий, существует ряд проблем, связанных с задержками обнаружения, помехами, а также ложными срабатываниями. В последние годы особое внимание уделяется внедрению технологий искусственного интеллекта для повышения эффективности функционирования ELT и автоматизации обработки сигналов.

**Постановка задачи.** Целью настоящего исследования является разработка и анализ интеллектуального модуля, интегрируемого в систему ELT, способного осуществлять:

- автоматическую фильтрацию и классификацию поступающих сигналов;
- адаптацию режимов работы радиомаяка в зависимости от окружающих условий и характеристик сигнального фона;
- повышение точности идентификации воздушных судов и сокращение времени реагирования поисковых служб.

**Методология.** В качестве базовой архитектуры был выбран ансамбль методов машинного обучения, включающий:

- предварительную обработку поступающих радиосигналов с применением методов цифровой фильтрации;
- классификацию сигналов по признакам источника, мощности, модуляции и частотным характеристикам с использованием алгоритмов случайного леса и глубоких нейронных сетей;
- оптимизацию алгоритмов передачи сигнала и выбора рабочих частот с учётом анализа реального радишума и помех.

Для моделирования использовалась программная платформа Python с библиотеками scikit-learn и TensorFlow. В качестве тестовой выборки применялись реальные и синтетические данные, имитирующие работу ELT в различных метеоусловиях и радиочастотных обстановках.

**Организация наземной и воздушной авиационной связи.** Под организацией связи понимают схему соединения абонентов каналами и распределения выделяемых для связи материальных, частотно-временных и энергетических ресурсов, обеспечивающую высокую эффективность обмена информацией между звеньями производственной структуры. Организация связи определяется структурой системы управления, составным элементом которой она является.

Основным элементом организационной структуры системы авиационной воздушной радиосвязи является радиосеть.

Радиосетью называется совокупность РС, устанавливаемых в точках расположения взаимодействующих корреспондентов (в диспетчерском пункте и на борту управляемых диспетчером ВС) и объединяемых общими радиоканалами, т. е. работающих на единых радиочастотах, назначенных для данной радиосети.

Организационная структура системы сетей воздушной радиосвязи определяется организационной структурой системы УВД (рис. 1). В каждой из зон УВД создается одна или несколько радиосетей в зависимости от числа секторов УВД.

Состав радиосетей и размещение наземных передатчиков выбирают таким образом, чтобы обеспечивалась непрерывная и надежная радиосвязь с ВС на всех этапах их полета от взлета до посадки.

Как правило, на каждом диспетчерском пункте, в каждом секторе УВД создается собственная радиосеть, независимая от радиосетей других зон и секторов. Создание независимых радиосетей обеспечивается выделением для них отдельных радиоканалов, исключающих возможность взаимных помех.

В случае если рабочая область наземной радиостанции сети недостаточна для охвата всей зоны управления, устанавливается наземный ретранслятор. Помимо радиосетей УВД в пределах всего воздушного пространства, используемого для полетов, создаются сети аварийно-спасательной службы и метеовещания.



Если нет возможности организовать передачу метеоинформации по особому радиоканалу, метеоданные сообщаются экипажу по его запросу диспетчером соответствующей зоны по радиосети УВД.

Состав средств радиосвязи на каждом диспетчерском пункте, их радиоданные и режим работы приводятся в Сборнике аэронавигационной информации [Aeronavigation Information Publication (AIP)].

Как правило, в сетях авиационной воздушной связи используется радиотелефонный режим работы.

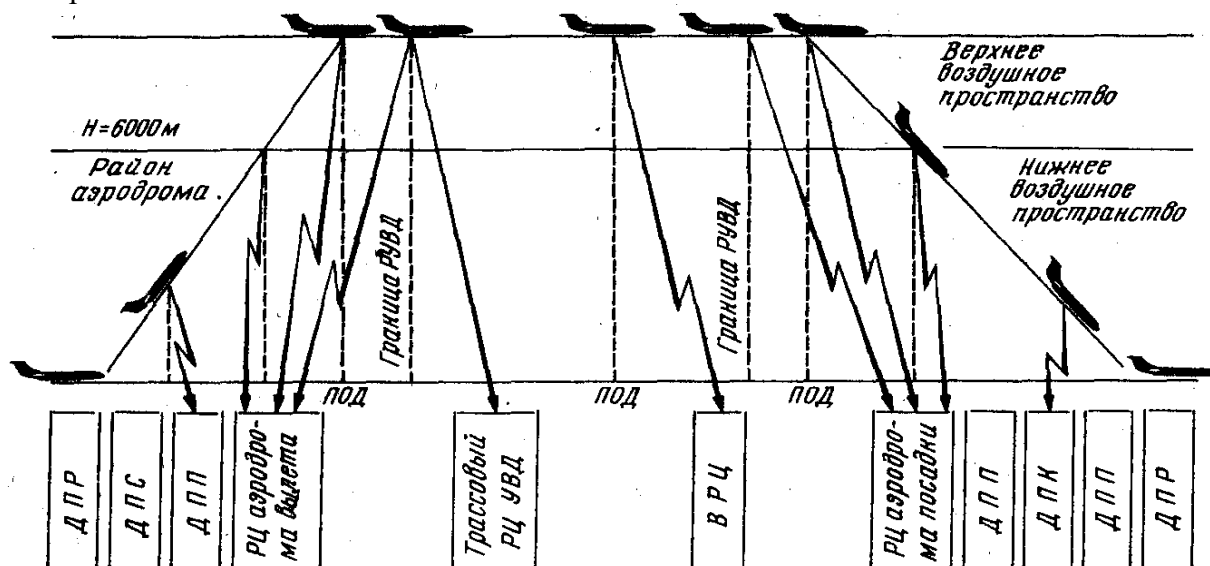


**Рисунок 1.** Схема управления движением ВС на магистральных воздушных трассах: ДПР, ДПС, ДПП, ДПК. ПДСП – диспетчерские пункты руления, старта, подхода, круга и посадки; РЦ – районный центр, РУВД – район УВД; ВРЦ – вспомогательный РЦ; ПОД – подпункт обязательных донесений; ЗВП – зона взлета и посадки

В сетях воздушной связи обычно назначается одна частота для передачи и приема, и связь осуществляется в так называемом симплексном режиме, когда передача и прием чередуются между собой. Достоинствами используемого при организации воздушной связи радиального метода построения сетей является их экономичность. Такая сеть реализуется с помощью минимального числа РС при минимальном числе рабочих частот.

Недостаток радиального принципа построения сетей заключается в их сравнительно низкой помехозащищенности: если обменивающиеся сообщениями корреспонденты выходят на передачу одновременно, то передаваемые ими сообщения не доходят до адресатов, так как прием сигналов в точках расположения работающих передатчиков невозможен.

В отличие от сетей воздушной радиосвязи, которые организуются с помощью радиосредств ГА службами ЭРТОС аэропортов, при создании сетей наземной связи широко используются каналы общегосударственных сетей связи.

**Полученные результаты.** Результаты моделирования показали, что применение интел-лектуального модуля обеспечивает:

- снижение количества ложных срабатываний ELT на 35–40% по сравнению с традиционными методами;
- повышение точности идентификации типа воздушного судна на 20–25%;
- сокращение времени передачи сигнала бедствия и обнаружения местоположения до 15–20% по сравнению с базовым сценарием.

Анализ устойчивости алгоритмов ИИ к помехам подтвердил их эффективность при высоком уровне фоновых шумов, характерного для современных радионавигационных систем.

**Заключение.** Внедрение технологий искусственного интеллекта в архитектуру ELT открывает новые возможности для повышения эффективности и надежности авиационных поисково-спасательных систем. Разработанный интеллектуальный модуль может быть интегрирован в современные и перспективные модели радиомаяков, обеспечивая адаптацию к внешним условиям и минимизацию человеческого фактора. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка встроенных ИИ-модулей на базе энергоэффективных микроконтроллеров и расширение применения методов глубокого обучения для анализа комплексных радиосигналов.

### Литература

1. Kuznetsov V.V., et al. Intelligent emergency locator transmitters for civil aviation // Aerospace Science and Technology, 2023.
2. Skrynnikova I.A., Algorithms for detection and localization of emergency beacons using neural networks // Russian Journal of Artificial Intelligence, 2022.
3. ICAO. Emergency Locator Transmitter (ELT) Performance Standards. ICAO, 2020.
4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016.
5. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006.

## APPLYING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES TO IMPROVE THE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF ELT SYSTEMS IN AVIATION

Asadov E.Z., Hasanly G.M., Sadigov G.E., Guliev R.R.

**Abstract.** The article discusses the possibility of integrating artificial intelligence (AI) technologies into the ELT (Emergency Locator Transmitter) system to improve the efficiency of aircraft detection and identification in emergency situations. An intelligent module for signal analysis and processing, as well as methods for optimizing the operation of the radio beacon using machine learning algorithms, are proposed. A comparative analysis of traditional and intelligent approaches is carried out, modeling results and recommendations for further implementation are presented.

**Keywords:** artificial intelligence, aviation, emergency radio beacon, ELT, machine learning, radio navigation, search and rescue.

## DEVELOPMENT OF SENSOR-BASED SOFTWARE FOR NORTH DIRECTION DETECTION



**Mammadov M.H.**  
*Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan*  
mirzemamedov05@gmail.com



**Sabziev A.N.**  
*Institute of Control Systems, National Defense University, Baku, Azerbaijan*  
elkhan.sabziev@gmail.com



**Pashayev A.B.**  
*Institute of Control Systems, National Defense University, Baku, Azerbaijan*  
adalat.pashayev@gmail.com



**Goyushov A.I.**  
*Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan*  
goyusovatakisi5@gmail.com

**Abstract.** Accurate heading estimation plays a vital role in modern navigation systems, particularly within intelligent and autonomous aviation technologies. This study proposes a cost-effective and practical approach for determining the true north direction and calculating the heading angle using an embedded microcontroller-based sensor integration system. The developed platform combines an MPU6050 triaxial accelerometer and an HMC5883L triaxial magnetometer, interfaced with an Arduino Uno, to simultaneously measure the spatial orientation of the object and the Earth's magnetic field. Accelerometer data are utilized to estimate the inclination and to identify the most horizontal projection plane by detecting the axis with the maximum acceleration. Magnetometer readings are subsequently projected onto this selected plane to determine the heading relative to a unified global Cartesian coordinate frame, where the Y-axis points north, the Z-axis is vertical, and the X-axis points east. Sensor initialization, calibration, and real-time data acquisition are implemented in the Arduino IDE using C programming and open-source libraries. The proposed algorithm adaptively selects the optimal plane and computes the heading angle based on the corresponding magnetic vector components, maintaining accuracy even under non-horizontal orientations. Experimental results demonstrate that the system achieves reliable and real-time heading estimation, offering potential for integration into AI-based navigation modules and smart avionics applications.

**Keywords:** North direction, course angle, horizontal plane, accelerometer, magnetometer, MPU6050, HMC5883L

**Introduction.** A key challenge in the control and navigation of moving objects is the precise identification of their direction of travel [1]. This issue has persisted throughout history, not just in

modern times. In earlier civilizations, people mainly used natural indicators—most notably, stars and celestial bodies—to determine their direction. Among these, the North Star and other constellations served as essential navigational tools [2]. Accurately pinpointing the direction toward the North Star was crucial for correctly determining the course of movement.

As modern technologies have evolved, so too have the instruments used for determining direction. Since the Middle Ages, the compass has been introduced and widely adopted. This device identifies the direction of north by utilizing the Earth's magnetic field [3]. Its functionality is based on the magnetic field's effect on the compass needle. The invention and use of the compass significantly contributed to global exploration and the growth of international trade [4].

Today, traditional methods are integrated with more advanced and accurate technologies. Among the many available techniques for addressing directional challenges, sensor technology stands out. This paper outlines how a sensor-based system implemented on the Arduino Uno microcontroller can be used to determine the direction of north. The system employs both magnetometer and accelerometer sensors to achieve this purpose [5].

In the study, the HMC5883L magnetometer and MPU6050 accelerometer were utilized as three-axis sensors [6,7]. The magnetometer measures magnetic field strength along three axes, while the accelerometer captures the forces acting on the object along each axis. The magnetometer data is used to identify the northern direction, whereas the accelerometer provides information about the object's orientation in space.

When mounted on a moving object, both sensors operate in tandem to determine the movement direction in real time relative to true geographic north. Since both magnetic field strength and mechanical loads are vector quantities, they are recorded according to each sensor's local coordinate system. For accurate operation, the coordinate axes of the magnetometer and accelerometer are aligned parallel to one another (Figure 1) [8]. This alignment ensures consistency in angular measurements between the sensors, enabling precise determination of the object's directional movement based on the collected data.

**Methods.** The knowledge of the north direction allows for determining the direction of an object's movement relative to this direction. The main objective of this research is to determine the course angle of a moving object using accelerometer and magnetometer sensors, specifically the angle between the projection of the object's displacement vector onto the horizontal plane and the north direction.

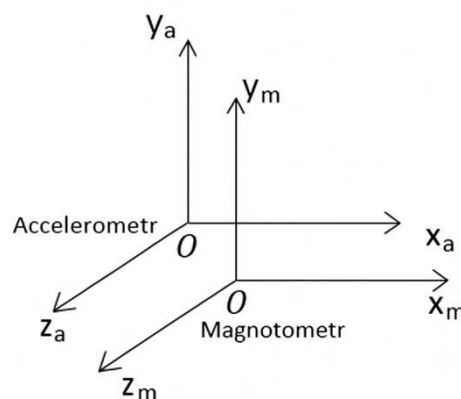


**Fig. 1.** Placement of the coordinate axes of the accelerometer and magnetometer

The data obtained from the accelerometer represent the components of the loading force acting on the object along  $x_a$ ,  $y_a$ , and  $z_a$  axes in relation to the local coordinate system of the accelerometer, while the data obtained from the magnetometer express the components of the

Earth's magnetic induction vector along  $x_m$ ,  $y_m$ , and  $z_m$  axes in relation to the local coordinate system of the magnetometer. This data is analyzed together in a structure where the coordinate axes of both sensors are arranged in parallel and established in a Descartes coordinate system. The Descartes coordinate system is a fundamental mathematical framework consisting of three main axes ( $X, Y, Z$ ) that describes the position of objects. In this system, the  $Y$  axis is defined towards the front of the object moving from the coordinate center, the  $Z$  axis is directed upwards from the coordinate center, and the  $X$  axis is oriented to the right from the coordinate center. The coordinate axes are arranged perpendicularly to each other. Let's define the global coordinate system as follows. The global coordinate system is a three-axis coordinate system where each axis is arranged perpendicularly to the others, forming a Descartes coordinate system. The  $Y_g$  axis of the global coordinate system is directed from the defined coordinate center towards the North Pole, the  $Z_g$  axis is directed upwards from the Earth's surface, and the  $X_g$  axis is oriented along the East direction from the coordinate center. The global coordinate system is illustrated in Figure 2.

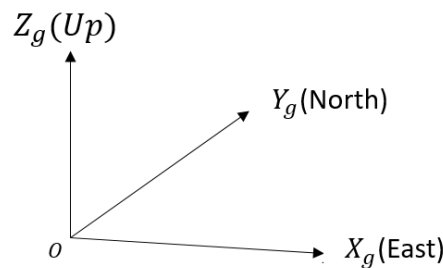


**Fig. 2.** Description of the global coordinate system

As a result, it becomes possible to determine on which plane the object's movement direction vector lies, whether it is on the  $x_a y_a$ ,  $O x_a z_a$  or  $O y_a z_a$  plane, and to calculate the course angle. The course angle is calculated based on the values of the magnetic induction vector obtained from the magnetometer along the  $x_m$ ,  $y_m$  and  $z_m$  axes. Both the north direction and the movement direction are defined with respect to the global coordinate system.

Analyzing data from the accelerometer and magnetometer is essential for identifying the object's position within a specific plane and its heading angle. This approach enables the assessment of the object's orientation based on the collected data. Methodology for Practical Implementation and Mathematical Computation

**Methodology for mathematical computation and practical implementation.** The program for the Arduino microcontroller is prepared using the Arduino IDE with C language. The program developed on the Arduino IDE platform determines the direction of north in any position of the object. The calculation of this direction consists of two stages. The first stage involves selecting the plane with the least inclination relative to the horizontal plane [9]. Since the accelerometer sensor is a three-axis sensor, and each axis is positioned perpendicular to the others, it creates three possible planes. To select the plane with the least inclination relative to the horizontal plane, the acceleration data of the object is used. To obtain the acceleration data, the capabilities of the MPU6050 accelerometer are utilized, and the MPU6050.h library is used in the program developed on the Arduino IDE platform to retrieve data from the MPU6050 sensor. To set up the MPU6050 sensor, the initialize and testConnection functions from the MPU6050.h library are used [10]. After setup, the getAcceleration function is used to obtain data. The acceleration data obtained using the MPU6050 sensor corresponds to the local coordinate system [11]. Based on the accelerations obtained from the accelerometer sensor for each axis, the axis with the highest magnitude of acceleration is considered to be aligned with the direction of the gravitational acceleration vector that



has the least inclination. Based on this principle, the length of the velocity vector is taken to be approximately 1.

$$|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \cong 1. \quad (1)$$

In Formula (1),  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  are the components of acceleration along the axes  $Ox_a$ ,  $Oy_a$  vs  $Oz_a$ , respectively, and  $|a|$  is the magnitude of the acceleration vector.

After selecting the plane, the second stage involves calculating the course angle. In this phase, the course angle is calculated using data obtained from the HMC5883L magnetometer sensor. The HMC5883L.h library is used to retrieve data from this sensor. This library utilizes three functions to initialize and calibrate the sensor. First, the “initCompass” function performs the initial setup of the HMC5883L magnetometer sensor. In this function, the “setScale” and “setMeasurementMode” functions are typically called to define the sensor's measurement range and operating mode. The “setScale”Z (float gauss) function determines the maximum range within which the HMC5883L sensor will measure the magnetic field and establishes the sensitivity level. The “setMeasurementMode” (uint8\_t mode) function selects the operating mode of the sensor, ensuring it operates in either continuous or single measurement mode. After this, information is obtained along the three axes of the local coordinate system using the “readRawAxis” function. In this stage, the magnetometer axes corresponding to the defined plane based on accelerometer data are selected, and the course angle ( $\varphi$ ) is calculated based on the data received from the magnetometer along those axes.

$$\varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \arctan \frac{a}{b} \quad (2)$$

In Formula (2), the variables  $a$  vs  $b$  depend on which of the accelerometer coordinate planes of the magnetometer is projected onto the  $OX_gY_g$  plane.

The options for projections are as follows:

- If the plane  $Ox_my_m$  is projected onto the global coordinate system  $OX_gY_g$ , then:  $a = x$ ,  $b = y$ ;
- If the plane  $Oy_mz_m$  is projected onto the plane  $OX_gY_g$ :  $a = z$ ,  $b = y$ ;
- If the plane  $Ox_mz_m$  is projected onto the plane  $OX_gY_g$ :  $a = z$ ,  $b = x$ .

Therefore, the values of  $a$  and  $b$  are defined based on the selected plane, and the course angles are derived from these values.

**Conclusions.** The Arduino Uno-based platform combined with MPU6050 and HMC5883L sensors provides accurate heading estimation in real time. By adaptively selecting the optimal horizontal plane and projecting magnetometer data, the system ensures precise north detection irrespective of object orientation. This method offers a robust solution for navigation in autonomous and intelligent systems.

## References

1. Crassidis, J. L., & Junkins, J. L. (2011). Optimal Estimation of Dynamic Systems (2nd ed.). Chapman & Hall/CRC. <https://www.routledge.com/Optimal-Estimation-of-Dynamic-Systems/Crassidis-Junkins/p/book/9781032917610>
2. Yuan, X., Yu, S., Zhang, S., Wang, G., & Liu, S. (2020). Quaternion-based unscented Kalman filter for accurate indoor heading estimation using wearable multi-sensor system. Sensors. <https://doi.org/10.3390/s150510872>
3. Łuczak, S., Grepl, R., & Bodnicki, M. (2017). Selection of MEMS accelerometers for tilt measurements. Journal of Sensors. <https://doi.org/10.1155/2017/9796146>

4. Shuster, M. D. (1993). A survey of attitude representations. Journal of the Astronautical Sciences. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03546284>
5. Revuelta, Á. L. (2017). Orientation estimation and movement recognition using low-cost sensors. Unpublished manuscript. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1127455>
6. Bedekar, V., & Tantawi, K. (2017). MEMS Sensors and Actuators. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32180-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32180-6_10)
7. Liu, D., Pei, L., Qian, J., & Liu, P. (2016). A novel heading estimation algorithm for pedestrians using a smartphone without attitude constraints. Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). <https://doi.org/10.1109/UPINLBS.2016.7809947>
8. Vasilyuk, N. (2019). Recurrent implementation of integral magnetometer calibration algorithm using the measurements of a three-axis gyro. Gyroscopy and Navigation. <https://doi.org/10.1134/S207510871904014X>
9. Markley, F. L., & Mortari, D. (2000). Quaternion attitude estimation using vector observations. The Journal of the Astronautical Sciences. <https://doi.org/10.1007/BF03546284>
10. Silva, R. D., & Correa, D. P. F. (2020). Design and implementation of a real-time attitude estimation system with low-cost sensors. ASBA Journal of Aerospace Engineering. <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1155>
11. Yang, Y. (2019). Spacecraft Modeling, Attitude Determination, and Control: Quaternion-Based Approach. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429446580>

## ŞİMAL İSTİQAMƏTİNİN MÜƏYYƏN EDİLMƏSİ ÜÇÜN SENSOR ƏSASLI PROQRAM TƏMİNATININ HAZIRLANMASI

Məmmədov M.H., Səbzəyev E.N., Paşayev Ə.B., Göyüşov A.İ.

**Xülasə.** Müasir naviqasiya sistemlərində, xüsusilə intellektual və avtonom aviasiya texnologiyalarında obyektin istiqamətinin dəqiq müəyyən edilməsi mühüm əhəmiyyət daşıyır. Bu tədqiqat, mikrokontroller əsaslı sensor inteqrasiyası ilə coğrafi şimal istiqamətinin və kurs bucağının təyini üçün praktik və sərfəli bir üsul təqdim edir. Təklif olunan sistem MPU6050 üçoxlu akselerometr və HMC5883L üçoxlu maqnitometrin Arduino Uno platforması üzərində birləşdirilməsinə əsaslanır və obyektin məkan oriyentasiyası ilə Yer maqnit sahəsini eyni zamanda ölçməyə imkan verir. Akselerometr məlumatları obyektin meyilliliyini təyin etmək və ən üfqi müstəvinini seçmək üçün istifadə olunur. Maqnitometr məlumatları bu müstəviyə proyeksiya edilərək global Kartezian koordinat sistemində uyğun olaraq istiqamət və kurs bucağı hesablanır (Y oxu şimala, Z oxu yuxarıya, X oxu şərqə yönəlmişdir). Sensorların qurulması, kalibrasiyası və real vaxtda məlumatların toplanması Arduino IDE və C proqramlaşdırma dili vasitəsilə həyata keçirilir. Təklif edilən alqoritm müxtəlif meyilli vəziyyətlərdə belə dəqiq nəticələr təmin edir. Eksperimental nəticələr bu sistemin süni intellekt əsaslı naviqasiya və ağıllı aviasiya tətbiqlərinə inteqrasiya üçün əlverişli olduğunu göstərir.

**Açar sözlər:** şimal istiqaməti, kurs bucağı, üfqi müstəvi, akselerometr, maqnitometr, MPU6050, HMC5883L

## 4D COMBINED BOUNDARY PROBLEM OF 3D IN THE MIDDLE - 1D IN THE GEOMETRICAL MIDDLE TYPE FOR 4D LOADING BIANCHI EQUATION WITH NON-SMOOTH COEFFICIENTS, ARISING IN THE MODELING OF VIBRATION PROCESSES



**Mamedov I.G.**

*Institute of Control Systems, Baku; Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan  
ilgar-mamedov-1971@mail.ru*



**Gasanov A.G.**

*Military Research Institute of the National Defense University, Baku, Azerbaijan  
arzuman.hesenov@mmu.edu.az, gasqhapk@gmail.com*



**Huseynov A.G.**

*Military Research Institute of the National Defense University, Baku, Azerbaijan  
ashraf.huseynov71@gmail.com*



**Abdullayeva A.J.**

*Military Research Institute of the National Defense University, Baku, Azerbaijan  
aynure.abdullyeva@mmu.edu.az, aynure-huseynova-2015@mail.ru*

**Abstract** In this paper substantiated for a 4D loading Bianchi equation with non-smooth coefficients a four dimensional combined boundary problem - 4D combined boundary problem of 3D in the middle -1D in the geometrical middle type with non-classical boundary conditions is considered, which requires no matching conditions. Equivalence of these conditions four dimensional boundary condition is substantiated classical, in the case if the solution of the problem in the isotropic S. L. Sobolev's space is found. The considered equation as a hyperbolic equation generalizes not only classic equations of mathematical physics (Laplace equation, telegraph equation, string vibration equation) and also many models differential equations (3D and 4D telegraph equation, 3D Bianchi equation, 3D and 4D wave equations and etc.). It is grounded that the 3D in the middle -1D in the geometrical middle combined boundary conditions in the classic and non-classic treatment are equivalent to each other. Thus, namely in this paper, the non-classic problem with 4D combined boundary problem of 3D in the middle -1D in the geometrical middle type conditions is grounded for a loading hyperbolic equation of fourth-order. For simplicity, this was demonstrated for one model case in one of S.L. Sobolev isotropic space  $W_p^{(1,1,1)}(G)$ .

**Keywords:** 4D combined boundary problem of 3D in the middle -1D in the geometrical middle type, 4D loading Bianchi equation, 4D mathematical modeling, loading hyperbolic equations, equation with non-smooth coefficients, equations with dominating mixed derivative.

**Introduction.** Hyperbolic equations are attracted for sufficiently adequate description of a great deal of real processes occurring in the nature, engineering and etc. In particular, many

processes arising in the theory of fluid filtration in cracked media are described by non-smooth coefficient hyperbolic equations.

Urgency of investigations conducted in this field is explained by appearance of local and non-local problems for non-smooth coefficients equations connected with different applied problems. Such type problems arise for example, while studying the problems of moisture, transfer in soils, heat transfer in heterogeneous media, diffusion of thermal neutrons in inhibitors, simulation of different biological processes, phenomena and etc. [1-3].

In the present paper, here consider four dimensional combined boundary problem- 3D in the middle -1D in the geometrical middle combined boundary problem for 4D loading Bianchi equation with non-smooth coefficients. The coefficients in this hyperbolic equation are not necessarily differentiable; therefore, there does not exist a formally adjoint differential equation making a certain sense. For this reason, this question cannot be investigated by the well-known methods using classical integration by parts and Riemann functions or classical-type fundamental solutions. The theme of the present paper, devoted to the investigation 3D in the middle -1D in the geometrical middle combined boundary problem for 4D loading Bianchi equations of hyperbolic type, according to the above-stated is very actual for the solution of theoretical and practical problems. From this point of view, the paper is devoted to the actual problems of applied mathematics and physics.

**Problem Statement.** Here  $u(x, y, z, t)$  is a desired function determined on  $G$ ;  $a_{i,j,k,l}(x, y, z, t)$  are the given measurable functions on  $G = G_1 \times G_2 \times G_3 \times G_4$ , where  $G_1 = (x_0, h_1)$ ,  $G_2 = (y_0, h_2)$ ,  $G_3 = (z_0, h_3)$ ,  $G_4 = (t_0, T)$ ,  $t_0 \geq 0$ ;  $S_{1,1,1,1}(x, y, z, t)$  is a given measurable function on  $G$ .

Equation (1) is a four dimensional loading Bianchi equation with four simple real characteristics  $x = const$ ,  $y = const$ ,  $z = const$ ,  $t = const$ . Therefore, in some sense we can consider equation (1) as a hyperbolic equation. Equations of the form (1) are used in the modeling of vibration processes [4].

In the present paper 4D loading Bianchi equation (1) is considered in the general case when the coefficients  $a_{i,j,k,l}(x, y, z, t)$  are non-smooth functions satisfying only the following conditions:

$$\begin{aligned}
 (V_{1,1,1,1}u)(x, y, z, t) \equiv & u_{xyz}(x, y, z, t) + a_{1,1,1,0}(x, y, z, t)u_{xyz}(x, y, z, \sqrt{t_0T}) + \\
 & + a_{1,1,0,1}(x, y, z, t)u_{xyt}(x, y, \frac{z_0+h_3}{2}, t) + a_{1,0,1,1}(x, y, z, t)u_{xzt}(x, \frac{y_0+h_2}{2}, z, t) + \\
 & + a_{0,1,1,1}(x, y, z, t)u_{yzt}(\frac{x_0+h_1}{2}, y, z, t) + a_{1,1,0,0}(x, y, z, t)u_{xy}(x, y, \frac{z_0+h_3}{2}, \sqrt{t_0T}) + \\
 & + a_{1,0,1,0}(x, y, z, t)u_{xz}(x, \frac{y_0+h_2}{2}, z, \sqrt{t_0T}) + a_{1,0,0,1}(x, y, z, t)u_{xt}(x, \frac{y_0+h_2}{2}, \frac{z_0+h_3}{2}, t) + \\
 & + a_{0,1,1,0}(x, y, z, t)u_{yz}(\frac{x_0+h_1}{2}, y, z, \sqrt{t_0T}) + a_{0,1,0,1}(x, y, z, t)u_{yt}(\frac{x_0+h_1}{2}, y, \frac{z_0+h_3}{2}, t) + \\
 & + a_{0,0,1,1}(x, y, z, t)u_{zt}(\frac{x_0+h_1}{2}, \frac{y_0+h_2}{2}, z, t) + \\
 & + a_{1,0,0,0}(x, y, z, t)u_x(x, \frac{y_0+h_2}{2}, \frac{z_0+h_3}{2}, \sqrt{t_0T}) + \\
 & + a_{0,1,0,0}(x, y, z, t)u_y(\frac{x_0+h_1}{2}, y, \frac{z_0+h_3}{2}, \sqrt{t_0T}) + \\
 & + a_{0,0,1,0}(x, y, z, t)u_z(\frac{x_0+h_1}{2}, \frac{y_0+h_2}{2}, z, \sqrt{t_0T}) + \\
 & + a_{0,0,0,1}(x, y, z, t)u_t(\frac{x_0+h_1}{2}, \frac{y_0+h_2}{2}, \frac{z_0+h_3}{2}, t) + \\
 & + a_{0,0,0,0}(x, y, z, t)u(\frac{x_0+h_1}{2}, \frac{y_0+h_2}{2}, \frac{z_0+h_3}{2}, \sqrt{t_0T}) = S_{1,1,1,1}(x, y, z, t) \in L_p(G), \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$a_{0,0,0,0}(x, y, z, t) \in L_p(G);$$

$$a_{1,0,0,0}(x, y, z, t) \in L_{\infty, p, p}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{0,1,0,0}(x, y, z, t) \in L_{p, \infty, p}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{0,0,1,0}(x, y, z, t) \in L_{p, p, \infty}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{0,0,0,1}(x, y, z, t) \in L_{p, p, p}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{1,1,0,0}(x, y, z, t) \in L_{\infty, \infty, p}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{1,0,1,0}(x, y, z, t) \in L_{\infty, p, \infty}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{1,0,0,1}(x, y, z, t) \in L_{\infty, p, p}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{0,1,1,0}(x, y, z, t) \in L_{p, \infty, p}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{0,1,0,1}(x, y, z, t) \in L_{p, \infty, p}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{0,0,1,1}(x, y, z, t) \in L_{p, p, \infty}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{1,1,1,0}(x, y, z, t) \in L_{\infty, \infty, p}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{1,1,0,1}(x, y, z, t) \in L_{\infty, \infty, p}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{0,1,1,1}(x, y, z, t) \in L_{p, \infty, \infty}^{x, y, z, t}(G);$$

$$a_{1,0,1,1}(x, y, z, t) \in L_{\infty, p, \infty}^{x, y, z, t}(G).$$

Under these conditions, we'll look for the solution  $u(x, y, z, t)$  of equation (1) in S.L.Sobolev isotropic space

$$W_p^{(1,1,1,1)}(G) \equiv \{u(x, y, z, t) : D_x^i D_y^j D_z^k D_t^l u(x, y, z, t) \in L_p(G), \quad i, j, k, l = \overline{0,1}\},$$

where  $1 \leq p \leq \infty$ .  $D_x^i = \partial^i / \partial x^i$  is a generalized differentiation operator in S.L.Sobolev sense,  $D_x^0$  is an identity transformation operator. We'll define the norm in the space  $W_p^{(1,1,1,1)}(G)$  by the



equality

$$\|u\|_{W_p^{(1,1,1)}(G)} = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{l=0}^1 \|D_x^i D_y^j D_z^k D_t^l u\|_{L_p(G)}$$

For 4D loading Bianchi equation (1) we can give the classic form 3D in the middle -1D in the geometrical middle combined boundary conditions in the form :

$$\left\{ \begin{array}{l} u(x, y, z, t) \Big|_{x=\frac{x_0+h_1}{2}} = N(y, z, t), (y, z, t) \in G_2 \times G_3 \times G_4; \\ u(x, y, z, t) \Big|_{y=\frac{y_0+h_2}{2}} = M(x, z, t), (x, z, t) \in G_1 \times G_3 \times G_4; \\ u(x, y, z, t) \Big|_{z=\frac{z_0+h_3}{2}} = \Psi(x, y, t), (x, y, t) \in G_1 \times G_2 \times G_4; \\ u(x, y, z, t) \Big|_{t=\sqrt{t_0 T}} = L(x, y, z), (x, y, z) \in G_1 \times G_2 \times G_3. \end{array} \right. \quad (2)$$

where  $N(y, z, t)$ ,  $M(x, z, t)$ ,  $\Psi(x, y, t)$  and  $L(x, y, z)$  are the given measurable functions on  $G$ . It is obvious that in the case of conditions (2), in addition to the conditions

$$N(y, z, t) \in W_p^{(1,1,1)}(G_2 \times G_3 \times G_4) \equiv \left\{ \tilde{N}(y, z, t) : D_y^j D_z^k D_t^l \tilde{N}(y, z, t) \in L_p(G_2 \times G_3 \times G_4), \quad j, k, l = \overline{0,1} \right\};$$

$$M(x, z, t) \in W_p^{(1,1,1)}(G_1 \times G_3 \times G_4) \equiv \left\{ \tilde{M}(x, z, t) : D_x^i D_z^k D_t^l \tilde{M}(x, z, t) \in L_p(G_1 \times G_3 \times G_4), \quad i, k, l = \overline{0,1} \right\};$$

$$\Psi(x, y, t) \in W_p^{(1,1,1)}(G_1 \times G_2 \times G_4) \equiv \left\{ \tilde{\Psi}(x, y, t) : D_x^i D_y^j D_t^l \tilde{\Psi}(x, y, t) \in L_p(G_1 \times G_2 \times G_4), \quad i, j, l = \overline{0,1} \right\};$$

and

$$L(x, y, z) \in W_p^{(1,1,1)}(G_1 \times G_2 \times G_3) \equiv \left\{ \tilde{L}(x, y, z) : D_x^i D_y^j D_z^k \tilde{L}(x, y, z) \in L_p(G_1 \times G_2 \times G_3), \quad i, j, k = \overline{0,1} \right\};$$

the given functions should also satisfy the following agreement conditions:

$$\left\{ \begin{array}{l} N(y, z, t) \Big|_{y=\frac{y_0+h_2}{2}} = M(x, z, t) \Big|_{x=\frac{x_0+h_1}{2}}, \\ N(y, z, t) \Big|_{z=\frac{z_0+h_3}{2}} = \Psi(x, y, t) \Big|_{x=\frac{x_0+h_1}{2}}, \\ N(y, z, t) \Big|_{t=\sqrt{t_0T}} = L(x, y, z) \Big|_{x=\frac{x_0+h_1}{2}}, \\ M(x, z, t) \Big|_{z=\frac{z_0+h_3}{2}} = \Psi(x, y, t) \Big|_{y=\frac{y_0+h_2}{2}}, \\ M(x, z, t) \Big|_{t=\sqrt{t_0T}} = L(x, y, z) \Big|_{y=\frac{y_0+h_2}{2}}, \\ \Psi(x, y, t) \Big|_{t=\sqrt{t_0T}} = L(x, y, z) \Big|_{z=\frac{z_0+h_3}{2}}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Consider the following non-classical 3D in the middle -1D in the geometrical middle combined boundary conditions:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{0,0,0,0}u \equiv u\left(\frac{x_0+h_1}{2}, \frac{y_0+h_2}{2}, \frac{z_0+h_3}{2}, \sqrt{t_0T}\right) = S_{0,0,0,0} \in R; \\ (V_{1,0,0,0}u)(x) \equiv u_x\left(x, \frac{y_0+h_2}{2}, \frac{z_0+h_3}{2}, \sqrt{t_0T}\right) = S_{1,0,0,0}(x) \in L_p(G_1); \\ (V_{0,1,0,0}u)(y) \equiv u_y\left(\frac{x_0+h_1}{2}, y, \frac{z_0+h_3}{2}, \sqrt{t_0T}\right) = S_{0,1,0,0}(y) \in L_p(G_2); \\ (V_{0,0,1,0}u)(z) \equiv u_z\left(\frac{x_0+h_1}{2}, \frac{y_0+h_2}{2}, z, \sqrt{t_0T}\right) = S_{0,0,1,0}(z) \in L_p(G_3); \\ (V_{0,0,0,1}u)(t) \equiv u_t\left(\frac{x_0+h_1}{2}, \frac{y_0+h_2}{2}, \frac{z_0+h_3}{2}, t\right) = S_{0,0,0,1}(t) \in L_p(G_4); \\ (V_{1,1,0,0}u)(x, y) \equiv u_{xy}\left(x, y, \frac{z_0+h_3}{2}, \sqrt{t_0T}\right) = S_{1,1,0,0}(x, y) \in L_p(G_1 \times G_2); \\ (V_{1,0,1,0}u)(x, z) \equiv u_{xz}\left(x, \frac{y_0+h_2}{2}, z, \sqrt{t_0T}\right) = S_{1,0,1,0}(x, z) \in L_p(G_1 \times G_3); \\ (V_{1,0,0,1}u)(x, t) \equiv u_{xt}\left(x, \frac{y_0+h_2}{2}, \frac{z_0+h_3}{2}, t\right) = S_{1,0,0,1}(x, t) \in L_p(G_1 \times G_4); \\ (V_{0,1,1,0}u)(y, z) \equiv u_{yz}\left(\frac{x_0+h_1}{2}, y, z, \sqrt{t_0T}\right) = S_{0,1,1,0}(y, z) \in L_p(G_2 \times G_3); \\ (V_{0,1,0,1}u)(y, t) \equiv u_{yt}\left(\frac{x_0+h_1}{2}, y, \frac{z_0+h_3}{2}, t\right) = S_{0,1,0,1}(y, t) \in L_p(G_2 \times G_4); \\ (V_{0,0,1,1}u)(z, t) \equiv u_{zt}\left(\frac{x_0+h_1}{2}, \frac{y_0+h_2}{2}, z, t\right) = S_{0,0,1,1}(z, t) \in L_p(G_3 \times G_4); \\ (V_{1,1,1,0}u)(x, y, z) \equiv u_{xyz}\left(x, y, z, \sqrt{t_0T}\right) = S_{1,1,1,0}(x, y, z) \in L_p(G_1 \times G_2 \times G_3); \\ (V_{1,1,0,1}u)(x, y, t) \equiv u_{xyt}\left(x, y, \frac{z_0+h_3}{2}, t\right) = S_{1,1,0,1}(x, y, t) \in L_p(G_1 \times G_2 \times G_4); \\ (V_{0,1,1,1}u)(y, z, t) \equiv u_{yzt}\left(\frac{x_0+h_1}{2}, y, z, t\right) = S_{0,1,1,1}(y, z, t) \in L_p(G_2 \times G_3 \times G_4); \\ (V_{1,0,1,1}u)(x, z, t) \equiv u_{xzt}\left(x, \frac{y_0+h_2}{2}, z, t\right) = S_{1,0,1,1}(x, z, t) \in L_p(G_1 \times G_3 \times G_4). \end{array} \right. \quad (4)$$

## References

1. Colton, D. (1972). Pseudoparabolic equations in one space variable, J. Different. equations, vol.12, No3, pp.559-565.
2. A.P.Soldatov, A.P., Shkhanukov, M.Kh. (1987). Boundary value problems with A.A.Samarsky general nonlocal condition for higher order pseudoparabolic equations, Dokl. AN SSSR, vol.297, No 3. pp.547-552.
3. Nakhushev, A.M. (1995). Equations of mathematical biology. M.: Visshaya Shkola, 301p.
4. Бондаренко, Б.А. (1987). Базисные системы полиномиальных и квазиполиномиальных решений уравнений в частных производных. – Ташкент: Фан, – 146 с.
5. Mamedov, I.G., Abdullayeva, A.J. (2018). On correct solvability of the boundary value problem in the non-classical treatment given on the geometric middle of the domain for one 3D Bianchi integro-differential equation, Sumgait State University: Scientific Izvestia, Series: Natural and Technical Sciences, Vol. 18, No. 3, pp. 4-13 (in Russian).
6. Mamedov, I.G., Abdullayeva, A.J. (2024). Fundamental Solution of One Boundary Value Problem on the Geometric Middle of the Domain for the 3d Bianchi Integrodifferential Equation, Journal of Contemporary Applied Mathematics, Volume 14, No 2, pp.26-37.

## VİBRASIYA PROSESİNİ TƏSVİR EDƏN QEYRİ-HAMAR ƏMSALLI 4D BİANCHİ TƏNLIYI ÜÇÜN 1D- HƏNDƏSİ ORTADA 3D -ƏDƏDİ ORTADA VERILMIŞ SƏRHƏD MƏSƏLƏSİ

Mamedov I.Q, Həsənov A.Q., Hüseynov Ə.Q., Abdullayeva A.C.

**Xülasə:** Bu yazıda qeyri-hamar əmsalları olan 4D yükləmə Bianchi tənliyi üçün əsaslandırılmış dörd ölçülü birləşmiş sərhəd problemi - ortada 3D-nin 4D birləşdirilmiş sərhəd problemi - qeyri-klassik sərhəd şərtləri olan həndəsi orta tiptə 1D-yə baxılır, bunun üçün uyğun şərtlər tələb olunmur. Problemin izotropik S. L. Sobolev fəzasında həlli tapıldıqda, dörd ölçülü sərhəd şərtinin bu şərtlərin ekvivalentliyi klassik əsaslandırılır. Hiperbolik tənlik kimi nəzərdən keçirilən tənlik təkcə riyazi fizikanın klassik tənliklərini (Laplas tənliyi, teleqraf tənliyi, simli vibrasiya tənliyi) deyil, həm də bir çox model diferensial tənlikləri (3D və 4D teleqraf tənliyi, 3D Bianchi tənliyi, 3D və 4D dalğa tənlikləri və s.) ümumiləşdirir. Klassik və qeyri-klassik müalicədə həndəsi orta birləşmiş sərhəd şərtlərində orta 1D-dəki 3D-nin bir-birinə ekvivalent olduğu əsaslandırılır. Beləliklə, məhz bu məqalədə həndəsi orta tipli şəraitdə orta-1D-də 3D-nin 4D birləşmiş sərhəd məsələsi ilə bağlı qeyri-klassik məsələ dördüncü dərəcəli yükləmə hiperbolik tənliyi üçün əsaslandırılmışdır. Sadəlik üçün bu, S.L.-dən birində bir model işi üçün nümayiş etdirildi. Sobolev izotrop fəzası  $W(LLL)(G)$ .

**Açar sözlər:** Həndəsi orta tiptə orta 1D-də 3D-nin 4D birləşdirilmiş sərhəd məsələsi, 4D yükləmə Bianchi tənliyi, 4D riyazi modelləşdirmə, yüklənmə hiperbolik tənliklər, qeyri-hamar əmsallı tənlik, dominant qarışıq törəmə ilə tənliklər.

## TƏK LÖVHƏLİ KOMPÜTER KLASTERLƏRİ VƏ ONLARIN TƏTBİQ SAHƏLƏRİ



**Rəhimova M.B**

Azərbaycan Hava Yolları” Sərnişin Aviasiya Şirkəti, Bakı, Azərbaycan  
rahimovamehri24@gmail.com



**İbrahimov R.Ə.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
rafaelibrahimov63@gmail.com

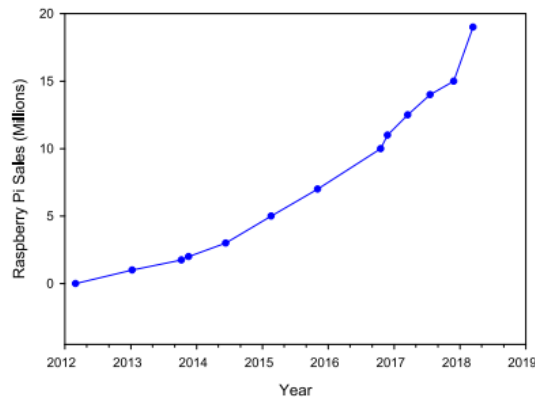
**Xülasə.** Bu məqalədə tək lövhəli kompüterlər (TLK) əsasında qurulmuş klaster sistemlərinin quruluşu, tətbiq sahələri və inkişaf istiqamətləri araşdırılır. Xüsusilə Raspberry Pi modelləri aşağı enerji sərfiyyatı, ucuz maliyyə və çevik yerləşdirilmə imkanlarına görə klaster hesablama üçün əlverişli platforma kimi qiymətləndirilir. Fərdi istifadəçilərdən tutmuş təhsil və tədqiqat müəssisələrinə qədər müxtəlif səviyyələrdə bu cür klasterlərdən istifadə olunur. TLK klasterləri müasir dövrdə Edge və Fog hesablama, IoT və kiber-fiziki sistemlər kimi sahələrdə mühüm rol oynayır. Bununla yanaşı, bu sistemlər bir sıra texniki problemlərlə — məhdud hesablama resursları, yüksək şəbəkə gecikməsi, fərqli avadanlıqların uyğunlaşdırılması və fiziki yerləşdirmə çətinlikləri ilə qarşılaşır. Bu problemlərin həlli məqsədilə enerji və şəbəkə infrastrukturuna xüsusi yanaşmalar tətbiq olunur. PoE texnologiyası və Pi-Stack modulları bu sahədə idarəetmə və enerji təchizatı baxımından səmərəli həllər təqdim edir. Gələcəkdə bu tip klasterlərin daha davamlı, modul əsaslı və fərdiləşdiriləbilən sistemlərə çevriləcəyi və təhsil, tədqiqat, hosting və paylanmış hesablama kimi sahələrdə daha geniş istifadə olunacağı gözlənilir.

**Açar sözlər:** tək lövhəli kompüter, klaster hesablama, Raspberry Pi, kiber-fiziki sistemlər, enerji səmərəliliyi, bulud hesablama, paylanmış sistemlər, təhsil texnologiyaları

**Giriş.** Single on board computer “tək lövhə üzərində qurulmuş kompüterdir; lövhənin üzərində CPU, RAM, giriş/çıxış interfeysləri bununla yanaşı tam funksiyalı kompüterlər üçün zəruri olan başqa komponentərdə olur. Tək çap lövhəli kompüterlərdə 3 əsas məqam nəzərə alınır. əlaqələndirilmiş giriş/çıxış (Input/Output) portlarının mövcudluğu, enerji sərfiyyatı və ümumi xərc. İlk baxışdan SBC lər və smartfonlar oxşardır [1]. Bəli SBC bəziləri eynilə müair smartfonlar kimi ARM prosessorlarından istifadə edir. Müasir dövrdə baş verən yeniliklərdən sonra SBClərə daha effektiv periferik qurğular əlaqələndirilməyə başlayıb. Bunlara missal olaraq FPGA (Field-Programmable Gate Array) və Pentium prosessoruyla birləşdirilən lövhəni göstərə bilərik.

Bununla yanaşı bir çox məhdudiyyətlər var onlardan biri də saxlama imkanlarının kifayət qədər geniş olmamasıdır. Bu məhdudiyyət əsasən yüksək sürətli bağlantı (interfeys) olmadığı üçün, böyük yaddaş qurğularına sürətlə məlumat oxumaq və yazmaq çətindir. Lakin bəzi alternativ modellər bu problemi SATA portları vasitəsilə həll etmişdir və bu sayədə standart HDD və SSD-lərin birbaşa qoşulmasına şərait yaranmışdır. Şəkil 1-də Raspberry Pi-nin illər üzrə satış göstəriciləri əks etdirilmişdir.





**Şəkil 1.** Raspberry Pi blogunun rəsmi məlumatlarına əsasən satılmış Raspberry Pi vahidləri (bütün illər üzrə)

**Metodlar.** Klaster “kompüterlərdən ibarət bir qrupdur; bu kompüterlər bir-biri ilə əlaqəlidir və vahid hesablama resursu kimi işləyərək bir maşın təsiri yaradır” kimi tərif olunur. Southampton Universitetində yerləşən Iridis 4 klasteri 2013-cü ildə 3.2 milyon funt sterlinqə satın alınmışdır [2]. Həmin ilin özündə Iridis-Pi adlı bir klaster qurulmuşdur və bu klasterin ümumi dəyəri adi bir işçi stansiyasının qiymətinə bərabər idi. Bu müqayisə kəskin görünə bilər – çünki Iridis 4 istifadəyə verildiyi dövrdə İngiltərədəki universitetlər arasında ən güclü superkompüter, eləcə də Böyük Britaniyada yerləşən 3-cü ən iri elmi superkompüter infrastrukturunu idi [3].

Klaster quruluşunun bu qədər ucuzlaşması, əvvəllər maddi imkanları buna çatmayan fərdi şəxslərə və şirkətlərə bu sahədə eksperimentlər aparmaq imkanı verərək klaster texnologiyalarını hobbist məqsədli istifadəçilərə də əlçatan etmişdir. Cədvəl 1-də nəşr olunmuş belə SBC klasterlərinin bəzi nümunələri göstərilir. Diqqətçəkən məqam odur ki, bu cədvəldəki bütün klasterlərdə əsas avadanlıq platforması olaraq Raspberry Pi istifadə olunmuşdur. NanoPC-T3, Orange Pi, Pine A64+ və BeagleBoard ilə də klaster prototipləri yaradılmışdır, lakin bu prototiplərin heç biri 10 düyündən yuxarı miqyasda genişləndirilməmişdir [4-7]. SBC klasteri yaradarkən üzləşilən əsas çətinliklərdən biri, onun fiziki yerləşdirilməsi və enerji/şəbəkə infrastrukturunun təmin olunmasıdır. Cədvəl 1-də təsvir edilən klasterlər bu problemləri fərdi dizaynı konstruksiyalarla həll etmişlər – bu strukturlar Lego bloklarından, taxta lövhələrdən və lazer kəsikli akril materiallardan ibarət ola bilər. Ən səliqəli və funksional yanaşmalardan biri, Mythic Beasts şirkətinin tətbiq etdiyi Ethernet üzərindən enerji (PoE – Power over Ethernet) texnologiyasıdır [8]. Bu üsul həm hər bir düyünün enerji ilə təchizatını sadələşdirir, həm də ümumi kabel sayını azaldır. Tam idarəolunan PoE kommutatorları, idarəolunmayan modellərlə müqayisədə daha yüksək qiymətlidir, lakin onların üstünlüyü ondan ibarətdir ki, hər bir düyünün enerji dövrüyyəsini uzaqdan idarə etmək mümkündür.

Cədvəl 1  
Dünyada həyata keçirilmiş seçilmiş tək lövhəli kompüter (SBC) klaster layihələri və onların istifadə məqsədləri

| Adı                                       | İl   | Sahib (Qurum/Şirkət)                  | Avadanlıq                | İstifadə məqsədi                                         |
|-------------------------------------------|------|---------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|
| Pi Co-location [9,10]                     | 2013 | PC Extreme (Niderland)                | 2500 ədəd Raspberry Pi 1 | Raspberry Pi hosting xidməti (hazırda istifadədən çıxıb) |
| Milli Laboratoriya Tədqiqat Klasteri [11] | 2017 | Los Alamos Milli Laboratoriyası (ABŞ) | 750 ədəd Raspberry Pi 3B | Əsas klasterdə tətbiqdən əvvəl tədqiqat və inkişaf       |

| Adı                         | İl   | Sahib (Qurum/Şirkət)                       | Avadanlıq                             | İstifadə məqsədi                                               |
|-----------------------------|------|--------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Bolzano Bulud Klasteri [12] | 2013 | Bolzano Azad Universiteti (İtaliya)        | 300 ədəd Raspberry Pi 1               | Təhsil, tədqiqat və inkişaf etməkdə olan ölkələrdə yerləşdirmə |
| SeeMore [13]                | 2015 | Virginia Texnologiya Universiteti (ABŞ)    | 256 ədəd Raspberry Pi 2               | İncəsənət instalyasiyası və təhsil                             |
| The Beast [14]              | 2014 | Resin.io (Böyük Britaniya)                 | 120 ədəd Raspberry Pi 1               | Paylanmış tətbiqlərin nümayişi və test edilməsi                |
| The Beast 2.0 [15]          | 2017 | Resin.io (Böyük Britaniya)                 | 144 ədəd Raspberry Pi 2               | Paylanmış tətbiqlərin nümayişi və test edilməsi                |
| Pi Hosting [8,16]           | 2016 | Mythic Beasts (Böyük Britaniya)            | Hər 4U rəfdə 108 ədəd Raspberry Pi 3B | Raspberry Pi hosting xidməti                                   |
| Raspberry Pi Cloud [17]     | 2013 | Qlazqo Universiteti (Böyük Britaniya)      | 56 ədəd Pi 1 və 14 ədəd Pi 2          | Tədqiqat və tədris üçün yüngül virtualizasiya                  |
| Bramble [18]                | 2015 | GCHQ (Böyük Britaniya)                     | 66 ədəd Raspberry Pi 1                | Daxili təlim və öyrədici vasitə                                |
| Iridis-Pi [19]              | 2013 | Sauthempton Universiteti (Böyük Britaniya) | 64 ədəd Raspberry Pi 1                | Təhsil məqsədi ilə istifadə                                    |

Bəzi klaster sistemlərində enerji və Ethernet bağlantısı üçün ayrıca infrastrukturdan istifadə olunur. Məsələn, IridisPi layihəsində hər bir düyün üçün ayrıca enerji mənbəyi tətbiq edilmişdi. Bu yanaşma enerji mənbəyində nasazlıq baş verdikdə yalnız bir lövhənin təsirlənməsi baxımından üstünlük təşkil edir, lakin fiziki ölçülər baxımından kompakt deyil. Alternativ yanaşmalardan biri The Beast layihəsində tətbiq olunmuş və burada çox çıxışlı DC enerji mənbələrindən istifadə edilərək fiziki yerə qənaət edilmişdir. Beast 2 layihəsində isə DC enerji bütün sistemə yayılır və hər bir düyün üçün lokal enerji modulu tətbiq olunur. Bu yanaşma enerji mənbəyinin mürəkkəbliyini azaldır, daha yüksək gərginliklə ötürməni təmin edir, nəticədə daha az cərəyan tələb olunur və kabel üzrə enerji itkisini minimuma endirir.

Klasterlərin şəbəkələşdirilməsi üçün əsasən iki yanaşma mövcuddur: klasterin mərkəzində bir neçə böyük kommutatordan istifadə və ya klasterin ətrafına yerləşdirilmiş çoxsaylı kiçik, təxminən 8 portlu kommutatorların tətbiqi. Hər iki halda da kabel idarəetməsi əsas texniki çətinliklərdən biri olaraq qalır.

Federated Raspberry Pi  $\mu$ -Infrastructure Testbed (FR $\mu$ IT) layihəsi Raspberry Pi və oxşar form-faktorda olan tək lövhəli kompüter klasterləri üçün interfeys lövhəsi – Pi-Stack interconnect lövhəsi hazırlamışdır. Bu lövhə hər bir düyünə müstəqil enerji idarəetməsi və monitorinqi, həmçinin infrastrukturun idarə olunması üçün ayrıca RS-485 kanalı əlavə edir. Hər Pi-Stack lövhəsinə RS-485 şinində unikal ünvan verilir və bir stakda 16 belə lövhə birləşdirilə bilər. Hər lövhə iki Raspberry Pi uyğun cihaz dəstəklədiyindən, bir stakda maksimum 32 düyün yerləşdirilə bilər. RS-485 interfeysi vasitəsilə hər düyün üçün real vaxtda gərginlik və cərəyan monitorinqi, əməliyyat sisteminin işləkliyini izləmək üçün fərdiləşdirilə bilən “heartbeat” siqnalları və planlaşdırılmış yenidən yükləmə və enerji kəsilməsi zamanı xəbərdarlıq funksiyaları təmin olunur. Hər düyün ayrıca enerji ilə təmin edilə və ya söndürülə bilər ki, bu da pik cərəyan yüklənmələrinin qarşısını almağa, istənməyən düyünlərin deaktiv olunmasına və ümumi istilik idarəetməsinin optimallaşdırılmasına imkan verir. SBC düyünləri Pi-Stack stəklərində dörd keçirici vida dayağı

vasitəsilə birləşdirilir. Bu dayaqlardan ikisi enerji, digərləri isə RS-485 rabitəsi üçün nəzərdə tutulub. Pi-Stack lövhələrində başlıqlar (headers), izolyasiya keçidləri (jumpers) və daxili enerji tənzimləyiciləri mövcuddur. Bu tənzimləyicilər sayəsində sistem 12V–24V arasında müxtəlif gərginliklərlə işləyə bilər ki, bu da daha çox düyünlə işləyərkən cərəyan tələbatını azaldır və eyni zamanda batareyalar və günəş panelləri ilə birbaşa uyğunluq yaradır.

**Hesablama üsulları.** Çoxlu sensor şəbəkə arxitekturaları ulduz (star) topologiyası təşkil edir, burada sensorlar kənarda yerləşir, məlumatların saxlanması və hesablama gücü isə mərkəzdədir (tez-tez bulud əsaslı saxlanma və hesablama). Bunun üstünlüyü odur ki, bütün məlumatlar bir yerdə toplanır və işlənir, bu da məlumatların idarə olunması və sonrakı emalını sadələşdirir. Amma çatışmazlığı ondan ibarətdir ki, bütün məlumatlar mərkəzi saxlama və hesablama mənbələrinə ötürülməlidir. Böyük miqyaslı tətbiqlərdə bu, genişliyi məhdud simsiz şəbəkələr və ya bahalı peyk uplinkləri vasitəsilə ötürülməni tələb edir. Məlumat genişliyindən daha səmərəli istifadə etmək üçün yalnız tələb olunan məlumatların ötürülməsi zəruridir. Üstəlik, məlumat mənbəyində ilkin emal aparmaqla ötürülən məlumatın həcmi azaldıla bilər; məsələn, yalnız xəbərdarlıqlar və ya yığılmış məlumatlar ötürülür. Bunun üçün hesablama gücü məlumat mənbələrinə yaxın yerləşdirilməlidir ki, bu da Edge Compute (Kənar Hesablama) adlanır. Hesablama məlumat mənbələrinə yaxın, amma birbaşa qoşulmamışdırsa, buna Fog Compute deyilir [20, 21].

SBC klasterlərinin çətinlikləri-SBC-lər müxtəlif miqyaslarda klasterlərin qurulmasını mümkün etmişdir, lakin ənənəvi klasterlərlə müqayisədə bəzi çatışmazlıqlara malikdir. Bu çatışmazlıqlar arasında hər düyün üçün məhdud hesablama resursları, məsələn CPU, RAM və yaddaşın məhdudluğu, avadanlıq nasazlığı ehtimalının yüksək olması, şəbəkə gecikməsinin artması, arxitektura uyğun kompilyator və qeyri-standart proqram təminatlarına ehtiyac və qarışıq aparat tərkibi kimi problemlər mövcuddur. Fərqli tipdəki SBC-lərin birlikdə işlədilməsi bu problemləri daha da mürəkkəbləşdirə bilər. İlk iki problem — məhdud resurslar və nasazlıq ehtimalı — klasterin miqyasını artırmaqla qismən aradan qaldırıla bilər. yüksək şəbəkə gecikməsinə aradan qaldırmaq daha çətindir. Bu xüsusilə Raspberry Pi-nin erkən modellərində müşahidə olunurdu. Belə ki, bu modellər USB2 interfeysi üzərindən 100 Mbps sürətə malik Ethernet adapterindən istifadə edir və bu da prosessorla birbaşa əlaqə imkanı vermir. Raspberry Pi 3B+ modeli Gigabit Ethernet adapteri ilə təchiz olunsa da, bu da hələ USB2 interfeysi ilə məhdudlaşır. Daha yeni modellər isə USB3 dəstəyi olan adapterlərə keçid etmişdir ki, bu da şəbəkə gecikməsinin azalmasına müsbət təsir göstərə bilər.

**Nəticə.** SBC klasterləri Edge və Fog hesablama, kiber-fiziki sistemlər (CPS) və IoT sahələrində aşağı enerji sərfiyyatı, yerləşdirilmə çevikliyi və fərdiləşdiriləbilən struktura görə ideal platforma hesab olunur. Bu klasterlərdə gələcəkdə hobbist layihələrdən daha çox möhkəm və uzunmüddətli istifadə üçün uyğunlaşdırılmış modellərə keçid gözlənilir. Neyron şəbəkələr kimi bəzi tətbiqlər məhdud resurslarla belə bu klasterlərdə uğurla işləməyə uyğunlaşdırılır. Təhsil sahəsində isə SBC klasterləri həm klaster hesablama öyrənilməsi, həm də model data mərkəzi kimi istifadə olunur. Eyni zamanda, aşağı səviyyəli hosting xidmətlərində fiziki SBC-lərin istifadəsi artacaq. Bu inkişaf nəticəsində klasterlərdə cihaz və tətbiq heterojenliyi artacaq və bu, həm aparat, həm də proqram təminatı infrastrukturunda dəyişikliklərə səbəb olacaq. Aparat baxımından müxtəlif tətbiqlərə uyğun fərqli SBC dizaynları və uzaqdan idarəetmə funksiyaları ilə təchiz olunmuş cihazlar yaranacaq. Artan müxtəliflik səbəbindən vahid cihaz konfigurasiyası mümkün olmayacaq və cihazdan asılı olmayan ortaq platforma nüvələri və plugin əsaslı idarəetmə sistemi lazım olacaq. Əsas çətinliklərdən biri isə stabil, çevik və fərqli aparata uyğun API-lərin hazırlanması olacaq.

### Ədəbiyyat

1. Wikipedia. (2017). *Single-board computer*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Single-board\\_computer](https://en.wikipedia.org/wiki/Single-board_computer)

2. Stallings, W. (2000). *Operating systems* (4th ed.). Prentice-Hall.
3. University of Southampton. (2013). *Switching on one of the most powerful supercomputers*. <https://www.southampton.ac.uk/news/2013/10/15-uos-one-of-the-most-powerful-supercomputers.page>
4. Smith, N. (2016). *40-core ARM cluster using the NanoPC-T3*. <http://climbers.net/sbc/40-core-arm-cluster-nanopc-t3/>
5. Smith, N. (2016). *5 Node Cluster of Orange Pi Plus 2Es*. <http://climbers.net/sbc/orange-pi-plus-2e-cluster/>
6. Smith, N. (2017). *Bargain 5 Node Cluster of PINE A64+*. <http://climbers.net/sbc/bargain-pine-a64-cluster/>
7. Antipasto Hardware. (2010). *How to make a BeagleBoard Elastic R Beowulf Cluster in a Briefcase*. <http://antipastohw.blogspot.co.uk/2010/09/how-to-make-beagleboard-elastic-r.html>
8. Stevens, P. (2016). *IPv6 Only hosting*. <https://indico.uknof.org.uk/event/36/contribution/5/material/slides/0.pdf>
9. PC Extreme. (2017). *Raspberry Pi colocation*. <https://web.archive.org/web/20170217070549/https://www.pcextreme.com/colocation/raspberry-pi>
10. Ambrosiano, N., & Poling, C. (2017). *Scalable clusters make HPC R&D easy as Raspberry Pi*. <https://www.lanl.gov/discover/news-release-archive/2017/November/1113-raspberry-pi.php>
11. PC Extreme. (2017). *About us*. <https://www.pcextreme.com/about>
12. Abrahamsson, P., Helmer, S., Phaphoom, N., Nicolodi, L., Preda, N., Miori, L., ... & Wang, X. (2013). Affordable and energy-efficient cloud computing clusters: The Bolzano Raspberry Pi cloud cluster experiment. In *2013 IEEE 5th International Conference on Cloud Computing Technology and Science* (pp. 170–175). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CloudCom.2013.121>
13. King, P. (2015). SeeMore - parallel computing sculpture. *The MagPi*, (40), 46–49.
14. Marinos. (2014). *What would you do with a 120-Raspberry Pi Cluster?* <https://resin.io/blog/what-would-you-do-with-a-120-raspberry-pi-cluster/>
15. Davis. (2017). *The evolution of the beast continues*. <https://resin.io/blog/the-evolution-of-the-beast-continues/>
16. Stevens, P. (2017). *RaspberryPiCloud*. <https://blog.mythic-beasts.com/wp-content/uploads/2017/03/raspberry-pi-cloud-final.pdf>
17. Tso, F. P., White, D. R., Jouet, S., Singer, J., & Pezaros, D. P. (2013). The Glasgow Raspberry Pi cloud: A scale model for cloud computing infrastructures. In *2013 IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops* (pp. 108–112). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2013.25>
18. GCHQ. (2015). *GCHQ's Raspberry Pi "Bramble" – exploring the future of computing*. <https://www.gchq.gov.uk/news-article/gchqs-raspberry-pi-bramble-exploring-future-computing>
19. Cox, S. J., Cox, J. T., Boardman, R. P., Johnston, S. J., Scott, M., & O'Brien, N. S. (2014). Iridis-pi: A low-cost, compact demonstration cluster. *Cluster Computing*, 17(2), 349–358. <https://doi.org/10.1007/s10586-013-0282-7>
20. Helmer, S., Salam, S., Sharear, A. M., Ventura, A., Abrahamsson, P., Oyetoyan, T. D., ... & Brocanelli, S. (2016). Bringing the cloud to rural and remote areas via cloudlets. In *Proceedings of the 7th Annual Symposium on Computing for Development (ACM DEV '16)* (pp. 1–10). ACM. <https://doi.org/10.1145/3001913.3001918>

21. Pahl, C., Helmer, S., Miori, L., Sanin, J., & Lee, B. (2016). A container-based edge cloud PaaS architecture based on Raspberry Pi clusters. In *2016 IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)* (pp. 117–124). IEEE. <https://doi.org/10.1109/W-FiCloud.2016.36>

## CLUSTERS OF SINGLE-BOARD COMPUTERS AND THEIR AREAS OF APPLICATION

*Rahimova M.B., İbrahimov R.A.*

**Abstract.** *The article examines the structure, application areas and development of cluster systems based on single-board computers (SBCs). SBCs, especially Raspberry Pi models, provide a convenient platform for cluster computing in terms of low power consumption, low cost and flexibility. Various educational and research institutions have built such clusters and used them for both teaching and real-world applications. SBC clusters play an important role in modern areas such as Edge and Fog computing, IoT and cyber-physical systems. However, these clusters face some technical challenges: limited computing power, high latency, compatibility of different hardware and physical placement problems. In modern projects, these challenges are addressed by implementing individual power and network infrastructure. Modules such as PoE technology and Pi-Stack provide efficient solutions in terms of management and power supply. In the future, SBC clusters will become more durable, modular and customizable systems and will be more widely used in areas such as education, research, hosting and distributed computing.*

**Keywords:** *single on board computer, edge compute, cluster, Internet of Things, Raspberry Pi*



## APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DEVELOPMENT OF UAV SYSTEMS



**Hashimov E.G.**

Azerbaijan Technical University, National Defense University, Baku, Azerbaijan  
hasimovel@gmail.com



**Talibov A.M.**

Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan  
talibovaziz1965@gmail.com

**Abstract.** The article analyzes the development of artificial intelligence (AI) and unmanned aerial vehicle (UAV) technologies and their application in the military sector. It highlights how AI and UAVs provide strategic advantages in modern warfare. The United States, China, Russia, and other developed countries have made significant advancements in the production of AI-equipped weapon systems and UAVs. The equipping of UAVs with various payloads and equipment, as well as their capabilities for autonomous control and target recognition, enhances their effectiveness in combat operations. The author emphasizes the importance of the use of UAVs during the 44-day Patriotic War of 2020, noting how Azerbaijan utilized these technologies and how other countries have studied this experience. The article forecasts that AI-equipped UAV systems will play a crucial role in the development of military power and defense strategies, with these technologies continuing to improve in the future.

**Keywords:** artificial intelligence, unmanned aerial vehicle, AI-equipped weapon systems, autonomous control

**Introduction.** With the rapid development of technology, leading countries (USA, China, Russia, Israel, South Korea, Japan, Turkey, etc.) have made significant advances in the development and production of technical complexes that operate without human intervention and are based on artificial intelligence (AI), with high autonomy capabilities. These countries are conducting active scientific research for the development of unmanned aerial vehicles (UAVs) and other military technologies where AI is applied [1,2].

Despite ongoing debates about artificial intelligence, from 2017 to 2020, significant scientific research was conducted globally, particularly in the aforementioned countries, on this subject. Many experts and specialists have concluded that AI will bring about revolutionary changes in the military sector. AI technologies are already being used in army buildings, weapon systems, the combat readiness of troops, and the management of operations. For instance, the U.S. Armed Forces plans for unmanned combat vehicles to constitute 30% of the total combat vehicles by 2030. According to military experts, the application of these technologies in combat operations will increase the combat capabilities of AI-equipped units by 2 to 2.5 times [3,4].

The use of AI-equipped weapon complexes can fundamentally change or reshape the principles of warfare. However, these changes will not be limited to the technical field; social and psychological factors will also create a new dimension in combat.

In the 44-day 2020 Patriotic War, the Azerbaijani Army's extensive use of unmanned aerial vehicles significantly increased operational effectiveness, minimizing personnel casualties. The

application of UAVs, particularly with the integration of AI technologies, accelerated processes such as the detection and automatic recognition of enemy invisible objects. In the future, the development of autonomous decision-making mechanisms for UAVs will lead to further optimization of combat operations and a reduction in losses.

This article explores modern trends in the development of UAV technologies and the application of artificial intelligence, analyzes the results of research conducted in various countries in this field, and presents the key technologies that should be considered for the development of UAV systems.

**Artificial intelligence and UAV systems.** Recent experiences in warfare and armed conflicts show that siege combat operations are characterized by several new features. These features include the use of unconventional combat tactics, enhanced accuracy of weapons and target selection capabilities, the dominance of information warfare, the application of computer modeling, and the introduction of new management systems. Based on these features, the overall technological development trend of weapons and military equipment reflects key tendencies such as the use of AI, miniaturization of weapon systems (production of small-sized and lightweight technologies), reduction of energy consumption, an increase in multifunctional and autonomous systems, and the simplification of supply logistics.

Many military experts and specialists believe that the application of artificial intelligence and robotic technology will radically change the methods of conducting combat operations and the technical specifications of modern weapon systems, resulting in both increased combat efficiency and reduced personnel casualties. These characteristics suggest that the most promising types of weapons and military technologies will primarily be military grade UAVs and robotic systems.

With the onset of the fourth technological revolution in the 2000s, funding for AI state programs significantly increased. This revolution is characterized by the elimination of distinctions in the physical, digital, and biological domains. In the future, technological breakthroughs in biotechnology, artificial intelligence, robotics, nanotechnology, and other fields will fundamentally change human life and activities [5].

In the past five years, many countries have continued to invest in AI technologies to enhance the effectiveness of weapon systems. According to foreign media sources, approximately 40 countries are conducting research into the development of combat robots that operate without human involvement. The United States, China, Russia, South Korea, and the European Union are among the leading countries in the development of AI-based weapon systems and complexes [6,7].

In terms of defense budget, the United States is the largest investor in this area, with its budget for the development of AI-based weapon systems reaching billions of dollars annually. In 2003, the U.S. Armed Forces had fewer than 100 UAVs, but by 2009, the number had increased to 5,300, and by 2013, it had surpassed 7,000. This indicates the growing investment in AI's military potential and the country's position as the world leader in this field [8,9].

China has emerged as a serious competitor to the United States' technological leadership, with a particular focus on "intelligent" weapon systems. These systems include space-based weapons, UAVs, directed-energy weapons, electromagnetic guns, and missile systems with individual targeting modules. The competition between China and the United States in this field raises questions about how this rivalry might shift the balance of global military power in the future.

Russia is another strong player in the development of artificial intelligence, planning to apply this technology as part of its defense strategy. However, Russia acknowledges that its financial investment in this area is much smaller than that of the United States. Russian President Vladimir Putin has openly stated that whoever leads in AI will become the "master of the world." However, Russia's investment in AI is only 0.01% of the U.S. defense budget [10-12].

Today, global investment in AI technologies and their military applications continues to grow, fundamentally altering the conditions for future wars and the methods of conducting combat operations.

**Development of UAV Systems Based on Modern Technologies.** The creation of military-grade artificial intelligence (AI) complexes and systems requires a thorough development of key technological directions. Military AI objects can be presented as complexes consisting of functionally interconnected elements. For example, the main elements of a UAV system may include:

1. Base (primary) carrier – the body or chassis of the UAV that supports various configurations.
2. Suspended (installed) special equipment in modular form for payload – allows the UAV to be equipped with specialized equipment for different missions.
3. Support and service tools used in preparation and technical maintenance – essential for maintaining the UAV in operational condition.

Depending on the functional purpose of the UAV, the following special equipment may be installed in the system: reconnaissance and observation devices; weapon systems; navigation devices; special technological equipment; telecommunication tools; software-based computing devices; electronic warfare (EW) tools; protective tools [13].

Additionally, the following tools are used in preparing UAV complexes for operation and in the technical maintenance process: information processing, control, and management dispatcher stations; delivery, transportation, and launch tools; refueling systems; tools for specialist training; documentation and spare parts kits.

UAV technologies can be divided into main and auxiliary technologies. The main technologies are directly applied to military UAVs, while auxiliary technologies are created for widely used flight apparatuses.

The main technologies include the following [1,4]:

- information acquisition and processing, situation assessment, and movement planning systems;
- automatic targeting and weapon control;
- remote and autonomous control of movement;
- automatic target recognition and dynamic scene analysis;
- artificial intelligence and human-machine interfaces;
- intellectual systems for group management.

The auxiliary technologies include:

- automatic control systems;
- development and operation of new prospective designs;
- energy technologies;
- creation and application of new materials and substances;
- geoinformation and precise global positioning;
- development of prospective sensor systems and their components;
- creation of optical and optoelectronic tools.

Additionally, the development of the following modern technologies is crucial for the advancement of UAV systems [1,14]:

- the creation of transgenic biopolymers for ultra-light, highly durable, and elastic materials that increase the invisibility of UAVs;
- the development of carbon nanotubes for use in UAV electronic systems;
- the creation of micro-electromechanical systems combining microelectronics and micromechanics;

- hydrogen engine development technologies;
- "Intelligent materials" technologies that perform specific functions under external influence. For example, the concept of wing size or shape change depending on flight mode has been developed by the Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) for UAVs, significantly enhancing maneuverability.
- the development of magnetic nanomaterials for large-scale data storage systems. This technology uses nanomaterials 10-20 nm in size, allowing for the storage of 400 Gbit of information per cm<sup>2</sup>.

The implementation of these technologies is critical in ensuring the necessary autonomy and artificial intelligence of modern UAVs.

During the Patriotic War, the extensive use of UAVs by the Azerbaijani Army increased the effectiveness of operations, minimizing personnel losses and enhancing the effectiveness of the weapon systems used against the enemy.

In the post-war period, military strategic research centers in the USA, Germany, and many other NATO countries began investigating the operations conducted by the Azerbaijani Army using UAVs [15-23]. According to military experts, armies of most European countries must learn from the results of this war to avoid falling into the dire situation faced by Armenia.

**Conclusion.** The analysis of the development of AI weapon systems by the leading countries in the world, the 44-day Second Karabakh War, and the experiences of other local conflicts lead to several important conclusions:

1. Uncertainty about future wars. It is difficult to precisely define the parameters of future wars, but weapon complexes based on artificial intelligence, particularly UAVs, have already altered the tactics of combat operations. Leading countries, especially the USA, China, Turkey, Israel, Russia, South Korea, and the European Union, are advancing in the development of AI-based UAV complexes.
2. Application of UAVs in combat operations. The widespread use of reconnaissance and strike UAVs has significantly reduced casualties in combat operations, particularly the loss of personnel, and has provided both tactical and psychological superiority over the enemy. In this regard, UAVs, particularly those manufactured in Turkey, have achieved significant success in wars around the world.
3. Strengthening Azerbaijan's defense capabilities. The development of AI-based UAV complexes and modern technologies, alongside the establishment and proper funding of scientific research centers focused on this area, can accelerate the enhancement of Azerbaijan's defense capabilities. The role of Azerbaijan's scientific organizations and their potential in this field is crucial.

## References.

1. Makarenko, S. I. (2016). Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития. *Системы управления, связи и безопасности*, 2, 74–124. <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf>
2. Hashimov, E. G., & Bayramov, A. A. (2017). *Application of GIS and seismic location method for detection of invisible military objects* (Monograph). Baku: Military Publishing House.
3. Boulanin, V., & Verbruggen, M. (2017). *Mapping the development of autonomy in weapon systems*. Solna: SIPRI.
4. Буренок, В. М., Ивлев, А. А., & Корчак, В. Ю. (2009). *Развитие военных технологий XXI века: проблемы, планирование, реализация*. Тверь: ООО «КУПОЛ».
5. Schwab, K. (2018). *The fourth industrial revolution*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/pages/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab>

6. Сизов, В. Ю. (2016). Какие боевые роботы нужны России? *Военное обозрение*. <https://topwar.ru/91962-kakie-boevye-roboty-nuzhny-rossii.html>
7. Сычев, В. (2018). Кто-то должен воевать. <https://nplus1.ru/material/2018/09/05/war-robots-laws>
8. Russell, S., & Norvig, P. (2003). *Artificial intelligence: A modern approach*. <http://aima.cs.berkeley.edu>
9. Geostrategy-Direct. (2018). China in “full-speed” push for “intelligentized” weapons to defeat U.S. <http://geostrategy-direct-subscribers.com/china-infull-speed-push-for-intelligentized-weapons-to-defeat-u-s/>
10. Карелов, С. В. (2018). Впереди ИИ-национализм и ИИ-национализация. *Российский совет по международным делам*. <http://russiancouncil.ru/ai-nationalization>
11. Bendett, S. (2017). Red robots rising: Behind the rapid development of Russian unmanned military systems. *The Strategy Bridge*. <https://thestrategybridge.org/the-bridge/2017/12/12/red-robots-rising-behind-the-rapid-development-of-russian-unmanned-military-systems>
12. Бендетт, С. (2019). Гонка боевых роботов и войны будущего. *Валдайские записки. Россия в глобальной политике*. <https://globalaffairs.ru/articles/gonka-boevyih-robotov-i-vojny-budushhego/#>
13. Hashimov, E. G., Bayramov, A. A., & Khalilov, B. M. (2015). Operative detection of ground enemy objects. *Herbi Bilik*, 1, 33–47.
14. Hasanov, A.H., Hashimov, E.G., Zulfugarov, B.S. (2023). Comparative analysis of the efficiency of various energy storages // - Kharkov: Advanced Information Systems, 7(3), 74–80. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.11>.
15. Piriyeu, H., & Hashimov, E. (2023). Second Karabakh war: Military-political and military-technical aspects. *Scientific Works of the Heydar Aliyev Military Institute*, 1(21), 7–16.
16. Huseynov, B. S., & Hashimov, E. G. (2023). Characteristics of UAVs application during the Second Karabakh War. In *Problems of informatization: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference*, 3, 10–11.
17. Hashimov E.G., Khaligov G. (2024). The issue of training of the neural network for drone detection // - Kharkov: Advanced Information Systems, 8(3), 53–58. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.06>
18. Hashimov E.G., Bayramov A.A., Sabziev E.N. (2017). Determination of the Bearing Angle of Unobserved Ground Targets by Use of Seismic Location Cells / *ISMT 2017 – 6<sup>th</sup> International Conference on Military Technologies*, Brno, Czech Republic, 185 – 188.
19. Bayramov, A.A., Hashimov, E.G. (2018). Assessment of invisible areas and military objects in mountainous terrain // *Defence Science Journal*, 68(4), 343 – 346. <https://doi.org/10.14429/dsj.68.11623>
20. Bayramov, A.A., Hashimov, E.G., Nasibov, Y.A. (2021). Unmanned Aerial Vehicle applications for military GIS task solution: vol. 3, Book chapter 44 // *Research Anthology on Reliability and Safety in Aviation Systems, Spacecraft, and Air Transport* / Ed. D.B.A. Mehdi Khosrow-Pour. – USA : IGI-Global Publ, P. 1092–1115. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5357-2.ch044>.
21. Hashimov E.G., Maharramov R.R. (2025). Taking Control of Dead Zone of Radiolocation Station by the Automatic Acting Electro-Optic System // *Defence Science Journal*, 75(1), 84–89. <https://doi.org/10.14429/dsj.19950>
22. Hashimov, E., Sabziev, E., & Huseynov, B. (2023). Targeting a rocket at a moving object using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Journal of Defense Resources Management*, 14(2), 117–124.



23. Bayramov, A.A., et al. (2018). The supervisory control systems deployment in mountainous terrain. In *VIII International Conference "Modern development trends of ICT and control methods"* (pp. 3–4).

## PUA SİSTEMLƏRİNİN İNKİŞAFINDA SÜNİ ZƏKANIN TƏTBİQİ

Həşimov E.Q., Talibov Ə.M.

**Xülasə.** Məqalə, süni intellekt (Sİ) və pilotsuz uçuş aparatları (PUA) texnologiyalarının inkişafını və hərbi sahədəki tətbiqini təhlil edir. Məqalədə, süni intellektin və PUA-ların xüsusilə müasir müharibələrdə necə strateji üstünlüklər təmin etdiyi vurğulanır. ABŞ, Çin, Rusiya və digər inkişaf etmiş ölkələr, süni intellektlə təchiz edilmiş silah sistemləri və PUA-ların istehsalı sahəsində böyük irəliləyişlər əldə ediblər. PUA-ların müxtəlif növ faydalı yük və avadanlıqlarla təchiz edilməsi, həmçinin avtonom idarəetmə və hədəf tanınması kimi imkanlar onların döyüş əməliyyatlarında effektivliyini artırır. Müəllif, 2020-ci ildəki 44 günlük Vətən müharibəsinin PUA-ların tətbiqi baxımından əhəmiyyətini qeyd edərək, Azərbaycanın bu texnologiyalardan necə istifadə etdiyini və digər ölkələr tərəfindən bu təcrübənin necə öyrənildiyini vurğulayır. Məqalə, süni intellektli PUA sistemlərinin hərbi gücün inkişafında və müdafiə strategiyalarında vacib rol oynadığını və bu texnologiyaların gələcəkdə daha da təkmilləşdiriləcəyini proqnozlaşdırır.

**Açar sözlər:** süni intellekt, pilotsuz uçuş aparatı, süni intellektlə təchiz edilmiş silah sistemləri, avtonom idarəetmə

## ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS FOR FAULT DETECTION AND MONITORING OF SMART AIR DATA PROBES IN MODERN AIRCRAFT



**Guliyev R.R.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
rauf.guliyev@naa.edu.az



**Kerimli T.I.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
tkarimli@naa.edu.az



**Hasanli G.M.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
ghasanli@naa.edu.az



**Asadov E.Z.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
elnur.asadov@naa.edu.az

**Abstract.** Nowadays, modern aircraft mostly use smart air data probes - they are integrated sensors that combine pitot, static, and temperature probes into one single unit. The smart probes are used in aircraft such as the Embraer E190, Airbus A350, Boeing 787 Dreamliner and etc. These smart probes represent new generation of air data sensors, so that many aviation companies can rely on them. While these systems improve integration and reduce wiring, they also present new challenges in terms of health monitoring and fault detection.

This paper illustrates and overview of air data smart probes, their functionality and introduces the role of artificial intelligence (AI) in monitoring the performance, health and detect faults. Generally, AI processes the output data to check signs of probe faults such as icing, or signal loss. Anomaly detection, supervised learning, and sensor fusion can be applied to find abnormal behavior of the smart probes in aircraft. The paper has suggestions how to deal with fault detection and how to predict non-standard procedures across multiple smart probes using AI-based models.

The purpose is to make easier development of intelligent air data systems that can predict faults early and improve flight safety. Mostly, during abnormal flight conditions the artificial intelligence can play a huge role, when timely recognition of air data faults is critical. The paper concludes with discussion of how AI can be implemented in smart probes, and what a huge impact it can have on flight safety by predicting false measurements.

**Keywords:** smart air data probes, artificial intelligence, pitot-static system, fault detection, air data system

**Introduction.** Accurate airspeed and altitude measurements are critical aspect of flight, which impact on safety of operations of any aircraft. Traditionally, these parameters are derived using a pitot-static system, which consists of separate pitot tubes and static ports connected to an Air Data Computer (ADC), using Bernoulli's principle, the pitot tube measures total pressure, while the static port captures ambient atmospheric pressure [1]. The ADC calculates dynamic pressure and airspeed from the difference between total and static pressure, by using the formula:

$$V = \sqrt{P_t - P_s} \quad (1)$$

Despite their simplicity and long history of use, conventional pitot-static systems rely on multiple separate components, pneumatic lines, and centralized processing, this all means that there are many chances of false reading data, complexity and more risk of flight failure [9].

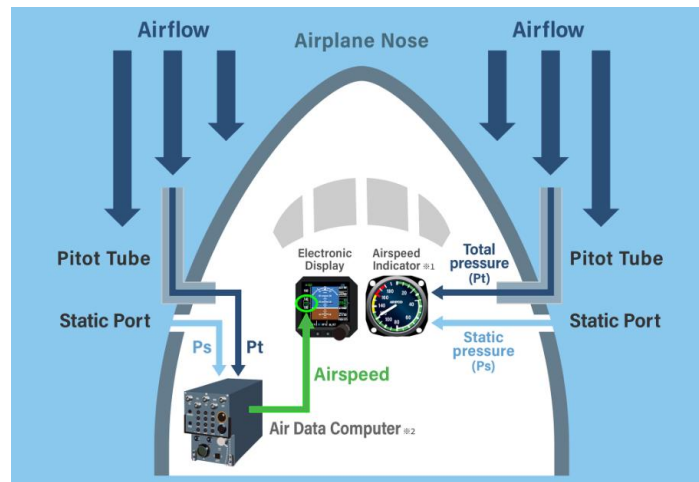


**Figure 17.** Traditional pitot-static system architecture for airspeed measurement using separate pitot tubes and static ports [1].

As Figure 1 above shows, this pitot-static system is used in most commercial and general aviation aircraft worldwide. Smart air data probes, also known as integrated air data sensors, are being used more and more in nowadays aircraft to make easier reading of air data and reduce complexity of the system. Pitot, static, and sometimes temperature sensors are all combined into one small device which is called Air Data Smart Probe (ADSP), in contrast to conventional methods, smart probes send digital air data straight to onboard systems while handling internal signal processing and pressure measurement [7, 8]. This integration enhances redundancy and maintainability while lowering weight, wiring, and system latency. Smart probes are a component of increasingly integrated flight control architectures seen in cutting-edge aircraft like the Boeing 787 Dreamliner, Airbus A350, and Embraer 190 [2, 3].



**Figure 18.** Air Data Smart Probe used in Modern Aircraft [4].

However, smart probes' small size (Figure 2) and its sensitiveness provide significant difficulties for problem detection and health monitoring. Smart probe problems could only be seen through their data output, as contrast to older systems where malfunctions might be physically removed and examined, in this regard, artificial intelligence (AI) presents promising potential for identifying anomalous activity, forecasting malfunctions, and improving system dependability in general [4, 6].

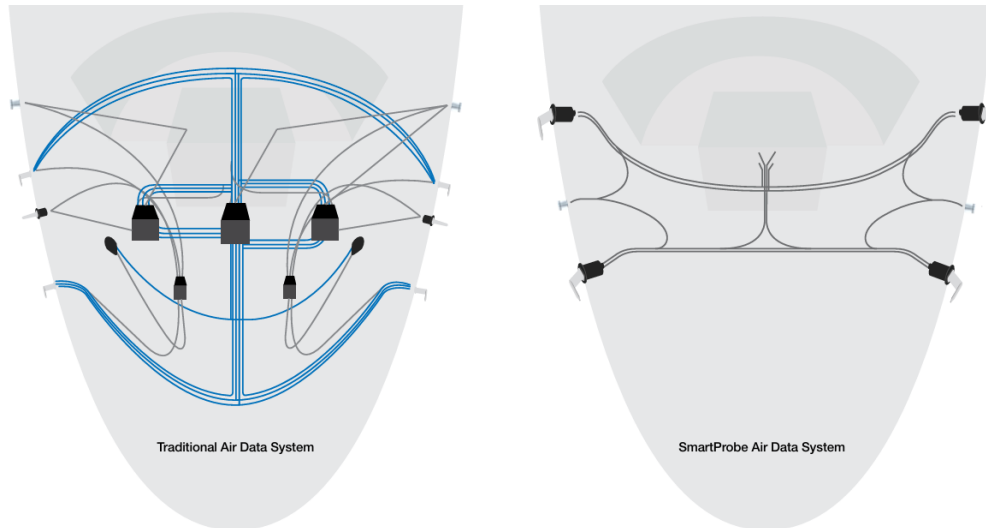


**Figure 19.** Comparison of Traditional and Smart Probe Air Data Systems [5].

Figure 3 compares the layout of a traditional air data system with a modern Smart Probe system. On the left, the traditional system features multiple separate sensors—pitot tubes, static ports, and angle-of-attack vanes—connected to an air data computer through a complex network of pneumatic lines and wiring, which is very complex system, because this setup increases system weight, complexity, and maintenance requirements [10, 11].

In contrast, the right side represents the Smart Probe Air Data System, where the pitot, static, and angle-of-attack sensors are integrated into fewer probe units. So these probes process the air data locally and transmit it digitally to the different aircraft systems, this design reduces wiring, enhances reliability, and allows for easier integration with advanced avionics and AI-enabled diagnostic systems [4].

**Method.** In this study, a simple MATLAB simulation was used to model the behavior of a smart air data probe under normal and faulty conditions. The probe's airspeed output was modeled as a linearly increasing function to represent a stable climb phase. To simulate a fault such as icing, the airspeed signal was artificially frozen at 10 seconds. A fault detection logic was applied, comparing the expected airspeed (from a model or alternate sensors) to the measured value. A threshold of 5 m/s was used to trigger a fault flag. Although this is a basic implementation, it represents the concept behind anomaly detection algorithms, which can learn such patterns using AI. This simulated data forms a conceptual base for training machine learning models in future work.

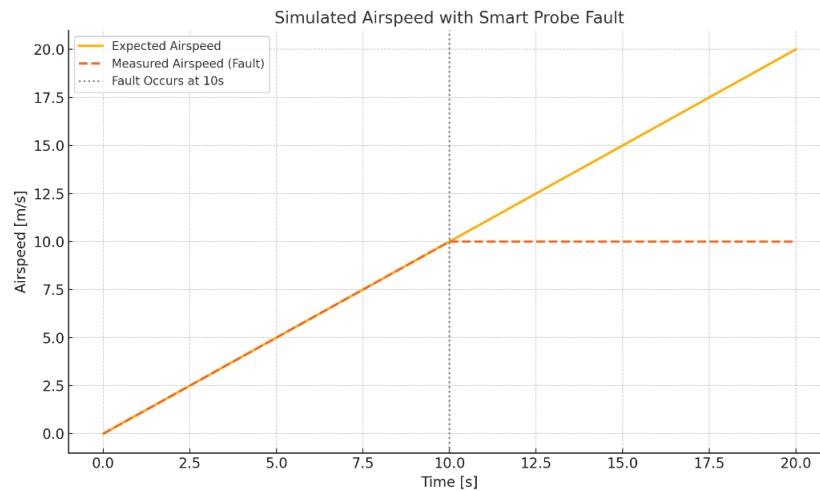


**Figure 20.** Simulated airspeed response under smart probe fault conditions.

The expected airspeed increases linearly, representing a steady climb. After 10 seconds, a simulated fault causes the measured airspeed to freeze, illustrating how a smart probe malfunction could be detected by comparing actual and expected values.

**Results and Discussion.** The simulation in Figure 4 demonstrates a realistic fault scenario in which the smart probe's measured airspeed becomes frozen due to a blockage or icing. This artificial condition was introduced at 10 seconds and successfully detected using a simple fault logic based on a 5 m/s deviation. Although this method is basic, it reflects how AI models—such as anomaly detection algorithms—could be trained to recognize such patterns. By analyzing time-series data from real flight probes, AI can detect hidden trends, predict failures, and improve reaction time compared to traditional rule-based systems.

This simulation is a step toward developing AI-based monitoring tools. Artificial intelligence can be trained on real-world flight data to detect subtle or progressive failures, such as sensor drift, signal loss, or freezing trends, which may not be immediately obvious using conventional detection methods. Such AI-driven health monitoring systems can enhance the reliability and safety of air data systems by providing earlier warnings and reducing the risk of undetected sensor malfunctions during flight.

**Conclusion.** This paper explored the role of artificial intelligence in monitoring and fault detection for smart air data probes used in modern aircraft. Beginning with a comparison to traditional pitot-static systems, the study outlined the advantages and limitations of smart probes. A simple simulation was developed to demonstrate a fault scenario, showing how a frozen airspeed output could be detected using model-based comparison. This concept reflects the potential of AI techniques to improve sensor reliability. In future work, machine learning models can be trained on real flight data to detect subtle faults such as drift, delay, or transient failures. Integrating such AI solutions into avionics could significantly enhance flight safety and maintenance efficiency.

## References

1. Airbus. (n.d.). *Technical training manual maintenance course—T1 & T2 navigation*. [Manual]. Airbus.
2. ATEQ Aviation. (2025). *Air data testing applications*. <https://www.ateq-aviation.com/air-data-testing/>
3. Aviation Safety Network. (n.d.). *[An Exclusive Service of Flight Safety Foundation]*. <https://asn.flightsafety.org/asndb/321502>



4. Benson, T. (n.d.). Pitot tube. NASA Glenn Research Center. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/pitot.html>
5. Boeing. (2010). 787 training student lab notebook: Navigation systems—Avionics (Book 4 of 5).
6. Collins Aerospace. (2017). Air data systems. Retrieved June 29, 2025, from <https://www.collinsaerospace.com/what-we-do/industries/commercial-aviation/flight-deck/surveillance/air-data-systems>
7. Collinson, R. (2011). Air data and air data systems. In *Introduction to avionics systems* (pp. 377–413). Springer.
8. Regli, C. (2024, February 20). *Manual Embraer E190* [Manual]. Retrieved June 29, 2025.
9. Robert, J. A., Geydu, U., & Fidencio, T. (2021). A review on pitot tube icing in aeronautics: Research, design and characterization—Future trends. *Flow Measurement and Instrumentation*
10. SR Technics. (2004, June). A320 family training manual: Airframe & powerplant/electrical/avionics (Level 3). Airbus.
11. Tokyo Aircraft Instrument Co., Ltd. (2021). What is a pitot tube? <https://www.tkk-air.co.jp/english/aerospace/air-data/pitot-tubes.html>

## MÜASİR TƏYYARƏLƏRDƏ AĞILLI HAVA MƏLUMAT ZONDLARININ NASAZLIQLARIN AŞKARLANMASI VƏ MONİTORİNQİ ÜÇÜN SÜNİ İNTELLEKT TƏTBİQLƏRİ

Guliyev R.R., Kerimli T.I., Hasanli G.M., Asadov E.Z.

**Xülasə.** Bu gün müasir təyyarələrin əksəriyyətində ağıllı hava məlumat zondlarından istifadə olunur — bunlar Pitot, statik və temperatur zondlarını vahid qurğuda birləşdirən integrə olunmuş sensorlardır. Bu ağıllı zondlar Embraer E190, Airbus A350, Boeing 787 Dreamliner və s. kimi təyyarələrdə tətbiq edilir. Onlar hava məlumat sensorlarının yeni nəslini təmsil edir və bir çox aviasiya şirkətləri tərəfindən etibarlı hesab olunur. Lakin integrasiyanı yaxşılaşdırıb kabelçəkməni azaltdıqları halda, işləkliyin monitorinqi və nasazlıqların aşkarlanması baxımından yeni çətinliklər yaradırlar.

Məqalə ağıllı hava məlumat zondlarına və onların funksionallığına ümumi baxış təqdim edir, həmçinin süni intellektin (Sİ) performansın və texniki vəziyyətin monitorinqində, eləcə də nasazlıqların aşkarlanmasında rolunu izah edir. Ümumilikdə, Sİ çıxış məlumatlarını emal edərək donma və ya signal itkisi kimi zond nasazlıqlarının əlamətlərini yoxlayır. Anomaliya aşkarlanması, nəzarətli öyrənmə və sensorların birləşdirilməsi metodları təyyarədə ağıllı zondların qeyri-normal davranışını müəyyən etmək üçün tətbiq oluna bilər. Məqalə, Sİ-yə əsaslanan modellərdən istifadə etməklə bir neçə ağıllı zond üzrə qeyri-standart prosedurların proqnozlaşdırılması və nasazlıqların aşkarlanmasının təşkili barədə təkliflər verir.

Məqsəd, nasazlıqları vaxtında proqnozlaşdırma bilən və uçuş təhlükəsizliyini artıran intellektual hava məlumatı sistemlərinin hazırlanmasını asanlaşdırmaqdır. Xüsusilə qeyri-normal uçuş şəraitində, hava məlumatı nasazlıqlarının vaxtında tanınmasının həlledici olduğu hallarda, süni intellekt mühüm rol oynaya bilər. Məqalə Sİ-nin ağıllı zondlarda necə tətbiq oluna biləcəyi və səhv ölçmələri öncədən proqnozlaşdırmaqla uçuş təhlükəsizliyinə göstərə biləcəyi böyük təsir barədə müzakirə ilə yekunlaşır.

**Açar sözlər:** ağıllı hava məlumat zondları, süni intellekt, Pitot-statik sistemi, nasazlığın aşkarlanması, hava məlumatı sistemi

## OPTİK SÜNİ İYBİLMƏ SİSTEMLƏRİ İLƏ PARTLAYICI MADDƏLƏRİN ULTRA-HƏSSAS AŞKARLANMASI



**Əhmədova S.T.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
sahmadova@naa.edu.az



**Əsgərov K.Ə.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
kamaliskra@mail.ru

**Xülasə.** Partlayıcı maddələrin operativ və yüksək etibarlı aşkarlanması müasir təhlükəsizlik konsepsiyalarının ayrılmaz hissəsidir. Bu məqalədə təbii qoxu sisteminin bioilhamlı analoqu olan optik süni iybilmə (OSI) sistemlərinin qurulma prinsipləri və partlayıcı maddələrin, xüsusən də bərk fazalı əldəqayırma partlayıcıların (ƏQP) ultra-həssas aşkarlanmasında istifadə potensialı təhlil edilir. Kimyəvi zond molekullarının seçilməsi, sensor massivi memarlığı, nümunənin tanınması alqoritmləri və portativ cihaz dizaynı üzrə son nailiyyətlər təqdim olunur. OSI-nin rəqib texnologiyalarla müqayisədə üstünlükləri – yüksək seçicilik, təmassız analiz və real vaxt monitorinqi – konkret tətbiq ssenariləri (hava limanları, sərhəd-keçid məntəqələri, poçt terminalları) kontekstində müzakirə edilir.

**Açar sözlər:** partlayıcı maddə, ultra-səs aşkarlama, aviasiya təhlükəsizliyi, süni iybilmə

**Giriş.** 1990-cı illərdən etibarən terror aktlarında əldəqayırma partlayıcıların (ƏQP) istifadəsinin artması təhlükəsizlik strukturlarında çevik, portativ və yüksək selektiv detektorların yaradılmasını zəruri etmişdir. Bu tendensiya yalnız hava limanlarında deyil, həmçinin sərhəd-keçid məntəqələrində, metro və dəmir yolu stansiyalarında, poçt və loqistika mərkəzlərində, kütləvi tədbirlərin keçirildiyi obyektlərdə və digər təhlükəsizlik həssas zonalarda sürətli və dəqiq aşkarlama texnologiyalarına tələbi gücləndirmişdir. Mövcud ənənəvi metodlar – ion-hərəkətliliyi spektrometriyası (IMS), kütlə-spektrometriya (MS), rentgen radiologiyası – yüksək dəqiqliyə malik olsa da, iri ölçülü quruluş, yüksək qiymət, enerji sərfiyyatı və bəzən nümunə hazırlığı tələb etməsi səbəbilə əməliyyat şəraitində tətbiqlərini məhdudlaşdırır. IMS və MS ultra-aşağı konsentrasiyaları aşkar edə bilir, lakin portativ versiyaların yaradılması bahalı və mürəkkəbdir, həmçinin sabit iş rejiminin təmin edilməsi və interferentlərin təsirinin azaldılması problemləri qalmaqdadır. MS əsaslı sistemlər laboratoriya şəraitində ən həssas yanaşma hesab edilsə də, onların daşınması, tez-tez kalibrləmə və texniki xidmət tələb etməsi real əməliyyat ssenarilərində istifadəsini çətinləşdirir.

Bunun əksinə olaraq, bioilhamlı optik süni iybilmə sistemləri (OSI) təmassız rejimdə, real vaxtda və sub-ppb həssaslıqda analiz imkanı təqdim edərək partlayıcıların aşkarlanmasında yeni imkanlar açır. OSI konsepsiyası bioloji qoxu sisteminin işləmə mexanizmini texnoloji platformaya daşımaqla çoxölçülü kimyəvi imzaların tanınmasını mümkün edir. Bioloji iybilmədə milyonlarla reseptor neyron müxtəlif kimyəvi bağlanma affinitetlərinə malik olur və onların kombinə olunmuş cavabları qoxu haqqında bütöv informasiyanı formalaşdırır. OSI bu mexanizmi sensor massivləri vasitəsilə təqlid edir: müxtəlif kimyəvi zondlar fərqli bağlanma və reaktivlik xüsusiyyətlərinə malik olur, onların sinergetik cavabları isə nümunənin “kimyəvi barmaq izi”ni

yaradır. Azotlu partlayıcılara qarşı aromatik nukleofilik doldurulmuş ftalosianinlər, peroksid əsaslı ƏQP-lərə qarşı boron-difluor üzvi difluoroforlar, həmçinin metal-kompleksli flavon törəmələri geniş şəkildə tədqiq olunmuşdur. Zond kimyasının seçimi spektroskopik oxunma üsulu ilə optimallaşdırılır: rəng dəyişikliyi və ya flüoresans söndürülməsi siqnalların əsasını təşkil edir [1].

Bu tip sensorlar çox vaxt  $4 \times 4$  və ya  $8 \times 8$  elementdən ibarət massivlər şəklində hazırlanır və şüşə, yaxud PDMS substratı üzərinə çap edilir. Massivin hər bir elementi LED-lazer hibrid işıq mənbəyi ilə işıqlandırılır, optik cavab isə mini-spektrometr vasitəsilə qeyd olunur. Bu yanaşma həm spektral məlumatların yüksək dəqiqliklə toplanmasına, həm də sensor massivin kiçik ölçüdə daha geniş məlumat spektri verməsinə imkan yaradır. Toplanan çoxölçülü spektral məlumatlar, adətən, ilkin mərhələdə əsas komponentlər analizi (PCA) kimi ölçü azaldılması metodları ilə emaldan keçirilir. PCA dominant dəyişənləri seçməklə çoxölçülü sistemin mürəkkəbliyini sadələşdirir və zond cavablarının orta xüsusiyyətlərini üzə çıxarır. Daha sonra bu məlumat bazası klassik xətti metodlardan olan LDA (Linear Discriminant Analysis) və ya müasir süni intellekt yanaşmaları ilə sinifləndirməyə daxil edilir.

PCA-LDA hibrid modeli müxtəlif partlayıcı tiplərini 96 % dəqiqliklə fərqləndirə bilir ki, bu da çoxkomponentli qarışıqlarda belə yüksək etibarlılıq səviyyəsi deməkdir. Lakin daha mürəkkəb və qeyri-xətti siqnalların emalında dərin öyrənmə yanaşmaları – xüsusilə konvolusion neyron şəbəkələri (CNN) daha effektiv nəticələr verir. Djitləşdirilmiş VGG-əsaslı CNN modelində dəqiqlik göstəricisi 98,3 %-ə qədər yüksəlmişdir. CNN-lərin üstünlüyü ondan ibarətdir ki, onlar siqnal formalarının məkan və spektral variasiyalarını çox səviyyəli filtrasiya yolu ilə öyrənir və nəticədə həm hədəf partlayıcı, həm də interferent maddələrin fərqli imzalarını daha etibarlı şəkildə ayıra bilir [2].

Bununla belə, belə modellərin uğurlu işləməsi üçün geniş və müxtəlif təlim nümunələri bazasına ehtiyac var. Təlim datasının yalnız laboratoriya şəraitində əldə olunması modelin sahə tətbiqlərində qeyri-stabil nəticələr göstərməsinə səbəb ola bilər. Bu səbəbdən real əməliyyat şərtlərindən – fərqli rütubət, temperatur, hava axını, toz və bioloji qarışıqlardan ibarət mühitlərdən də təlim məlumatlarının toplanması xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Həmçinin, sensorların zamanla degradasiyası və ya cavablarının zəifləməsi alqoritmlərin performansını azalda bilər. Bu halda modelin adaptiv şəkildə yenidən öyrədilməsi, on-line kalibrəmə mexanizmlərinin əlavə olunması və periodik “self-learning” modullarının tətbiqi vacibdir.

Əlavə olaraq, CNN və digər dərin öyrənmə yanaşmalarının əməliyyat şəraitinə inteqrasiyası üçün hesablama resurslarının optimallaşdırılması tələb olunur. Yüksək dəqiqlik əldə etmək üçün çoxsəviyyəli şəbəkələr böyük hesablama gücü tələb etsə də, son illərdə “edge computing” texnologiyaları, yüngülləşdirilmiş modellər (məsələn, MobileNet, SqueezeNet) və FPGA/ASIC əsaslı akseleratorlar OSI sistemlərinin portativ cihazlara inteqrasiyasını mümkün etmişdir. Bu isə real vaxt rejimində saniyələr ərzində cavab verməyə imkan yaradır və əməliyyat effektivliyini artırır.

Ümumilikdə, sensor massivlərindən əldə olunan optik siqnalların PCA, LDA və CNN əsasında işlənməsi OSI sistemlərinin selektivlik və həssaslıq baxımından rəqabət üstünlüyünü nümayiş etdirir. Bu yanaşma müxtəlif sinif partlayıcı maddələrin bir-birindən fərqləndirilməsində, hətta yaxın kimyəvi quruluşa malik qarışıqların aşkarlanmasında özünü doğruldur. Lakin praktiki tətbiqlərdə uzunmüddətli stabil iş, dəyişən mühit şərtlərinə adaptasiya, genişlənən təlim məlumat bazalarının idarə olunması, həmçinin hesablama resurslarının optimallaşdırılması istiqamətində işlərin davam etdirilməsi vacibdir. Bu amillərin uğurlu həlli OSI sistemlərini yalnız laboratoriya prototipi deyil, həm də əməliyyat şəraitində etibarlı aşkarlama vasitəsi kimi möhkəmləndirəcək [3].

Portativ OSI prototipləri artıq praktiki baxımdan əlçatan səviyyəyə çatmışdır. Hazırlanmış qurğu LED-lazer hibrid işıq mənbəyi, 180–800 nm diapazonunda işləyən mini-spektrometr, Raspberry Pi əsaslı idarəetmə sistemi və batareya qidalanması ilə təchiz olunmuşdur. Cəmi 1,1 kq

kütləyə malik olan bu yüngül və kompakt konstruksiya əl ilə daşınaraq mobil yoxlama əməliyyatlarında istifadəyə imkan yaradır. Qapalı sınaq şəraitində (25 °C, 50 % nisbi rütubət) TNT-nin aşkarlanma həddi 0,4 ppb səviyyəsində qeydə alınmışdır ki, bu da laboratoriya şəraitində OSI sistemlərinin yüksək həssaslıq qabiliyyətini təsdiqləyir.

Bununla belə, real əməliyyat şəraitində rütubət və temperaturun kəskin dəyişmələri, havadakı digər üzvi və qeyri-üzvi kimyəvi qarışıqlar, toz və aerosol hissəciklərinin təsiri, həmçinin aerodinamik faktorlar OSI performansını məhdudlaşdırır. Bu səbəbdən, gələcək tədqiqatlarda aşağıdakı istiqamətlər mühüm əhəmiyyət kəsb edir:

- **Sensor massivlərinin modifikasiyası:** səth funksionallaşdırılması və yeni optik materialların tətbiqi ilə seçiciliyin artırılması;
- **Mühit adaptasiyası:** rütubət və temperatur kompensasiyası üçün əlavə sensor bloklarının inteqrasiyası;
- **Maşın öyrənməsi yanaşmaları:** transfer learning və onlayn öyrənmə metodları ilə dəyişkən real şərtlərə daha sürətli uyğunlaşma;
- **Enerji və hesablama optimallaşdırılması:** portativ sistemlərdə batareya ömrünü artırmaq və emal sürətini yüksəltmək üçün alqoritmik və texnoloji həllərin tətbiqi;
- **Sahə sınaqları:** aeroporta bənzər real mühitlərdə uzunmüddətli testlərin aparılması.

Belə yanaşmalar OSI sistemlərinin yalnız nəzəri və laboratoriya səviyyəsində deyil, həm də əməliyyat şəraitində etibarlı, yüksək selektiv və davamlı aşkarlama texnologiyası kimi tətbiqini təmin edəcək [4].

**Nəticə.** Ümumilikdə, optik süni iybilmə sistemləri portativlik, selektivlik və yüksək həssaslıq kimi üstünlükləri birləşdirərək partlayıcı maddələrin aşkarlanmasında ənənəvi metodlara alternativ və ümidverici yanaşma təqdim edir. Zond kimyasının təkmilləşdirilməsi, sensor massivlərinin stabilliyinin artırılması və maşın-öyrənmə əsaslı nümunə tanınma alqoritmlərinin inkişafı bu texnologiyanın daha geniş tətbiqinə yol açacaqdır. Praktiki kommersiya tətbiqi üçün sahə şəraitində geniş testlər, standartlaşdırma və sertifikatlaşdırma işləri prioritet təşkil etməlidir. Beləliklə, OSI sistemləri yaxın gələcəkdə müasir təhlükəsizlik infrastrukturunun ayrılmaz elementi kimi formalaşdırıla bilər.

### Ədəbiyyat

1. Erdogan, K., & Yilmaz, N. (2014). Advances in computing, electronics and electrical technology. Kuala Lumpur: Proceedings.
2. Liu, Y., Zhang, J., & Zhao, X. (2020). Ratiometric fluorescent probe array for ultralow TNT detection. *Analytical Chemistry*, 92(23), 13980–13988.  
<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c03250>
3. Qian, S. H., Li, Z., & Chen, Y. (2016). Hybrid electronic nose for explosive vapor recognition. *RSC Advances*, 6(9), 7902–7910.  
<https://doi.org/10.1039/C5RA25565C>
4. Weber, M. J. (2004). *Handbook of lasers and optics*. Weinheim: Wiley-VCH.

### ULTRA-SENSITIVE DETECTION OF EXPLOSIVES WITH OPTICAL ARTIFICIAL SMELL SYSTEMS

Ahmadova S.T., Asgarov. K.A.

**Abstract.** *Rapid and highly reliable detection of explosives is a cornerstone of modern security concepts. This paper analyses the design principles of optical artificial olfaction (OAO) systems a bio-inspired analogue of the biological sense of smell and their potential for the*

*ultrasensitive detection of explosives, with emphasis on solid-state improvised explosive devices (IEDs). Recent advances in probe molecule engineering, sensor array architecture, pattern-recognition algorithms and portable hardware integration are surveyed. The inherent advantages of OAO high selectivity, non-contact analysis and real-time monitoring are discussed in comparison with competing technologies and mapped onto concrete use-case scenarios such as airports, border checkpoints and postal hubs.*

**Keywords:** explosives, ultrasonic detection, aviation security, artificial olfaction



## BIO-INSPIRED FORTIFICATION OF OTP ENCRYPTION: A NOVEL APPROACH TO PREVENT KEY RECOVERY



**Huseynzade I.M.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
hzadeh.isa.naa@gmail.com

**Abstract.** While the One-Time Pad (OTP) is renowned for its absolute theoretical security, practical usage faces significant vulnerabilities due to the simplicity with which keys can be compromised when intercepted. This paper proposes an innovative bio-inspired enhancement to the traditional OTP encryption to significantly minimize the likelihood of key recovery, even if the ciphertext and transformed key fall into unauthorized hands. Specifically, we incorporate genetic algorithm-inspired processes – uniform crossover and mutation – to dynamically alter the OTP key before transmission. A carefully chosen subset of additional data, consisting of a masking sequence and mutation position, is transmitted separately through a secure channel, dramatically complicating unauthorized key reconstruction. Experimental assessments indicate that, unlike classical OTP where key recovery is straightforward given plaintext and ciphertext, the bio-inspired variant achieves robust security by vastly reducing predictability and making brute-force attacks effectively infeasible. The proposed method thus maintains OTP's inherent security advantages while overcoming its critical practical vulnerabilities, providing enhanced reliability for contemporary cryptographic applications.

**Keywords:** one-time pad, key recovery, bio-inspired encryption, unpredictability, genetic crossover, mutation, cryptographic security

**Introduction.** In the contemporary digital age, digital communication security has become a cornerstone of information security, with confidential information being transmitted repeatedly over diverse and often susceptible mediums. The One-Time Pad (OTP) algorithm, long celebrated for its theoretically unbreakable cipher, is among the most elegant designs in cryptography. However, despite this theoretical strength, OTP is plagued by inherent weaknesses in practical applications, most notably the susceptibility with which an encryption key can be reconstituted if even limited amounts of ciphertext or plaintext are compromised. In such cases, the perfect secrecy assured under ideal conditions collapses, and the system remains exposed, rendering OTP less amenable to large and dynamic communication environments where the dangers of exposure are difficult to control [1-3].

Addressing these limitations entails proposing mechanisms that both preserve OTP's theoretical guarantees and render it applicable to the realities of modern threat environments. In this context, inspiration from biological evolutionary mechanisms – genetic algorithms in particular – has proven to be a promising direction of innovation in cryptography. Genetic operators such as uniform crossover and mutation are celebrated for their ability to induce diversity, randomness, and strength in adaptive systems. Translated into cryptographic key management, these processes yield a novel mechanism to disrupt predictability and radically improve resilience to unauthorized reconstruction attempts [4].

Taking this idea further, the present paper suggests an improved OTP-based encryption system that incorporates genetic-inspired changes to dynamically alter the key before transmission. By adding crossover and mutation processes and deriving auxiliary information from controlled side channels, the novel method not only reduces the possibilities of unauthorized key recovery to a

minimum but also increases overall system unpredictability and resilience. In doing so, it maintains the theoretical advantages of OTP while extending its viability to contemporary applications where resilience and flexibility are most paramount [5].

**Methods.** Methods provides a mathematical definition of the proposed bio-inspired extension of the One-Time Pad cipher. It outlines the whole cycle of the procedure, i.e., key generation and decryption, to facilitate demonstration of how genetic algorithm operations such as crossover and mutation get integrated into the workflow of cryptoprocessing. This methodology framework not only prescribes the scheme of technical realization but also constitutes the foundation on which the methodology can be evaluated for security and efficacy.

1. Key Generation and Initial Encryption:

- A random OTP key (K) of length n bits is generated.
- Ciphertext (C) is created through an XOR operation:  $C = M \oplus K$  [3].

2. Uniform Crossover via Masking:

- The key K is divided into two equal segments [5].
- A randomly generated mask of length n/2 bits determines bitwise inheritance from each segment, forming two offspring segments.
- These offspring segments are concatenated to form a temporarily transformed key (K') [2,5].

3. Mutation Procedure:

- A single randomly selected bit in K' is flipped to create a mutated key (K'') [4,5].

4. Secure Data Transmission:

- Ciphertext C and the mutated key K'' are transmitted openly.
- The mask and the position of the mutation are sent via a secure side channel.

5. Decryption Process:

- The receiver reverses the mutation on K'' using the known mutation position to reconstruct K'.
- Using the mask, the receiver performs the inverse crossover to recover the original key K.
- The original plaintext message (M) is recovered by XORing K with C.

Both classical and bio-inspired OTP encryption methods were experimentally evaluated to assess the feasibility of key recovery by unauthorized parties possessing only intercepted ciphertext and transformed keys.

**Results and discussion.** Experimental results demonstrate a drastic difference between the classical OTP and the suggested bio-inspired encryption method. In the case of the traditional OTP, the experiments positively confirmed that when the attackers had access to both the ciphertext and the corresponding plaintext, they were indeed capable of reproducing the encryption key in all instances. This 100% recovery rate illustrates a fundamental weakness of the conventional approach: the moment a small amount of information is leaked or intercepted; the absolute secrecy theoretical assurances are effectively voided. Findings such as these serve to strengthen the reasons why the OTP, although theoretically ideal, is widely regarded as not feasible to extend to actual applications that involve insecure and uncontrollable communication channels.

In stark contrast, the bio-inspired method exhibited an effectively zero possibility of successful key recovery, even when attackers had the same benefits, e.g., complete exposure to both the transmitted ciphertext and modified key. This striking finding underscores the revolutionary effect of incorporating the concepts of genetic algorithms, i.e., crossover and mutation, into the encryption procedure. By dynamically altering the key before transmission and dispersing important auxiliary information through a separate secure channel, the system herein significantly increases the difficulty in reproducing the original key. Even brute-force attacks relying on exhaustive

guessing are rendered computationally infeasible, thereby introducing OTP-based encryption to practical applications where there are non-trivial threats of interception.

The distinction between the two approaches, as Figure 1 portrays, is not just quantitative but also conceptual. It marks a departure from the weak determinism of the conventional OTP to a system based on unpredictability and adaptive complexity. The almost zero percent recovery rate demonstrated by the bio-inspired variant provides strong evidence that genetic mutations, when applied in a selective manner, can fundamentally alter the balance between cryptanalysts and protectors of cryptographic systems. The outcome opens the door to an updated role of OTP encryption, where theoretical elegance is augmented by practical robustness, such that the scheme is empowered to withstand the demands of modern data security contexts.

```
# Parameters
N = 16
trials = 1000
classic_recovered = 0
bio_recovered = 0

for _ in range(trials):
    M = generate_random_bits(N)
    OTP = generate_random_bits(N)
    C = xor_bits(M, OTP)

    # Classical OTP
    recovered_otp = xor_bits(C, M)
    if np.array_equal(recovered_otp, OTP):
        classic_recovered += 1

    # Bio-inspired OTP
    MS = generate_random_bits(N//2)
    p1, p2 = OTP[:N//2], OTP[N//2:]
    child1, child2 = uniform_crossover(p1, p2, MS)
    OTP_CR = np.concatenate([child1, child2])
    OTP_CR_M, mut_idx = single_point_mutation(OTP_CR)
    C_bio = xor_bits(M, OTP_CR_M)

    found = False
    for _ in range(1000):
        guess = generate_random_bits(N)
        if np.array_equal(guess, OTP):
            found = True
            break
    if found:
        bio_recovered += 1

# Proportion
classic_success_rate = classic_recovered / trials
bio_success_rate = bio_recovered / trials
```

**Fig.21.** Python code for comparison of key recovery probabilities of Classic and Bio-inspired OTP

This utter imbalance serves to further reinforce that the addition of the genetic changes – specifically crossover and mutation – introduces plenty of randomness into the encryption process. By disrupting the determinism of the classic OTP, these operations create a dynamic system where the encryption key cannot be recreated by simple inference. The variability thus introduced effectively limits an adversary's capacity to exploit intercepted information, effectively rendering the encryption process less predictable and inflexible and more adaptive and resilient. In practice, this unpredictability is manifested in an encryption model in which unauthorized key acquisition is essentially impossible even in a context where the attackers have extensive information on the data being transmitted.

Furthermore, while the traditional OTP has only difference in one single very narrow sense, the bio-inspired version adds variation across multiple stages of the process. Each transformation – crossover for structural recombination and mutation for random transformation – contributes to a

larger space of possible key states and therefore makes both analytical methods and brute force attacks harder. This multi-level uncertainty not only reduces but actually resists the inherent weakness present in the traditional OTP paradigm. As is evidenced in Figure 2, the new strategy therefore has an additional layer of resilience to real-world conditions of usage, and consequently is a reasonable and forward-thinking step-up to one of cryptography's most theoretically stunning but practically fragile systems.

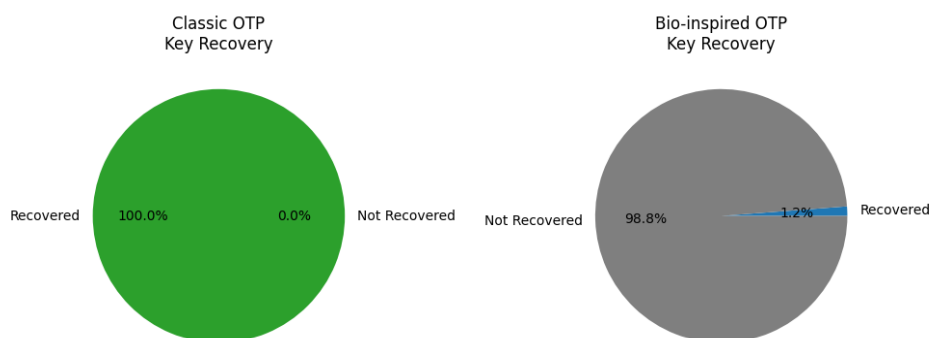


**Fig.2.** Visualization of results of comparison

**Conclusions.** In this article, a bio-inspired solution was presented to strengthen OTP encryption by minimizing the chance of key recovery. By integrating genetic operations such as crossover and mutation into the encryption process and transmitting very minimal auxiliary information via secure channels, the scheme maintains classical OTP's theoretical benefits while surmounting one major practical problem. The results foreground that uncertainty, infused through biologically inspired mechanisms, provides a significant resilience against interception and brute-force retrieval. Unlike the traditional OTP, the proposed approach remains secret even when partial information is disclosed, evolving the model from brittle determinism to adaptive complexity. In conclusion, the enhanced OTP protocol not only fixes a well-known weak point of the original scheme but also opens possibilities for future research in bio-inspired cryptography. It provides a strong and practical solution for modern systems requiring high randomness and robust resistance to key recovery.

### References

1. Katz, J., & Lindell, Y. (2015). Introduction to Modern Cryptography (2nd ed.). CRC Press.
2. Academic Press. Shannon, C. E. (1949). Communication Theory of Secrecy Systems. Bell System Technical Journal.
3. Gasimov, V.A. (2009). Fundamentals of Information Security. Baku.
4. Yang, X.-S. (2021). Nature-Inspired Optimization Algorithms (2nd ed.).
5. Wirsansky, E. (2020). Hands-On Genetic Algorithms with Python. Packt Publishing Ltd.

## OTP ŞİFRLƏMƏSİNİN BIO-ƏSASLI GÜCLƏNDİRİLMƏSİ: AÇARIN BƏRPASININ QARŞISINI ALMAQ ÜÇÜN YENİ BİR YANAŞMA

Hüseynzadə İ.M.

**Xülasə.** Təkestifadəlik açar (OTP) nəzəri baxımdan mütləq təhlükəsizlik təmin etməsi ilə məşhur olsa da, praktik tətbiq zamanı açarların asanlıqla ələ keçirilməsi nəticəsində əhəmiyyətli

*zəifliklər ortaya çıxır. Bu məqalədə OTP şifrələməsinə bio-əsaslı yeni bir yanaşma təqdim olunur və bu yanaşma vasitəsilə, şifrmətn və çevrilmiş açar icazəsiz şəxslərin əlinə keçsə belə, açarın bərpa olunma ehtimalı ciddi şəkildə azaldılır. Konkret olaraq, genetik alqoritmlərə əsaslanmaqla yaradılmış proseslər (bircins çarpazlaşma və mutasiya) OTP açarını ötürülmədən əvvəl dinamik şəkildə dəyişdirmək üçün tətbiq edilir. Maskalama sətri və mutasiya mövqeyindən ibarət əlavə məlumatın diqqətlə seçilmiş bir altqrupu isə ayrıca etibarlı bir kanal vasitəsilə ötürülür ki, bu da icazəsiz açar bərpasını xeyli çətinləşdirir. Eksperimental qiymətləndirmələr göstərir ki, klassik OTP şifrələməsində açarın bərpası açıq mətn və şifrmətn məlum olduqda nisbətən asan olduğu halda, bio-əsaslı variantda bu ehtimal əhəmiyyətli dərəcədə azaldılır və “brute-force” hücumları faktiki olaraq qeyri-mümkün olur. Təklif edilən metod OTP-nin əsas təhlükəsizlik üstünlüklərini qoruyub saxlayır və onun praktik zəifliklərini aradan qaldıraraq müasir kriptografik tətbiqlər üçün daha yüksək etibarlılıq təmin edir.*

**Açar sözlər:** *təkestifadəlik açar, açarın bərpası, bio-əsaslı şifrələmə, proqnozlaşdırılmazlıq, genetik çarpazlaşma, mutasiya, kriptografik təhlükəsizlik*



## HAVA LİMANLARININ PERİMETRİNİN MÜHAFİZƏSİ İLƏ ƏLAQƏLİ TƏHLÜKƏ RİSKLƏRİNİN QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ



**Safarov S.H.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
ssafarov@naa.edu.az



**Behbudlu Ş.E.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
behbudlushamil@gmail.com

**Xülasə.** Risk, müəyyən bir təhlükənin və bu təhlükəyə məruz qalan insanların, o cümlədən iqtisadi itkilərin ehtimalını ifadə edir. Aviasiya təhlükəsizliyində isə risk, təkə hava limanlarının terminal binalarının təhlükəsizliyi və mümkün ola biləcək təhdidlərin aşkarlanması deyil, həmçinin perimetrin qorunması və qeyri-qanuni müdaxilələrin aşkar edilməsi ilə əlaqələndirilir. Hava limanı perimetrinin mühafizəsi məsələsində ən vacib yanaşmalardan biri riskin modelləşdirilməsidir.

Risk qiyətləndirilməsi, müxtəlif təhlükələrin baş vermə tezliyini və ehtimallarını təhlil edərək aparılır. Hava limanlarının perimetrində qeyri-qanuni müdaxilələrin aşkar edilməsi üçün müxtəlif aşkarlama üsullarının inteqrasiya edilməsi və bu sistemlərin parametrlərinin düzgün qiyətləndirilməsi tələb olunur.

**Açar sözlər:** risk, perimetr, vibrasiya mühafizə, videomüşahidə kameraları, infraqırmızı mühafizə.

**Giriş.** Hava limanlarının perimetrinin mühafizəsi aviasiya təhlükəsizliyi sistemlərinin ən vacib tərkib hissələrindən biridir. Hava limanlarında qeyri-qanuni müdaxilələrin və təhlükəsizlik pozuntularının qarşısını almaq üçün yüksək səviyyəli monitoring və qiyətləndirmə sistemləri tətbiq olunur. Bu sistemlərin effektivliyini təmin etmək üçün riskin düzgün qiyətləndirilməsi və modelləşdirilməsi böyük əhəmiyyət kəsb edir. Beləliklə, riskin qiyətləndirilməsi hava limanlarının təhlükəsizlik strukturlarının təkmilləşdirilməsi və potensial təhdidlərin qarşısının alınması üçün vacib alətlərdən biridir.

Risk sözü gələcəkdə müəyyən bir müddət ərzində canlılara, o cümlədən insanlara zərər verə biləcək potensial zərəri və müəyyən təhlükədən iqtisadi itkiləri ifadə edir. Risk dedikdə, müəyyən bir təhlükə qrupunun gözlənilən tezliyi və ya ehtimalı, yaxud arzuolunmaz hadisələr nəticəsində mümkün zərərin (itkilərin) həcmi və ya bu kəmiyyətlərin müəyyən kombinasiyası başa düşülür [1].

Hava limanının perimetrinin mühafizəsi məsələsi aviasiya təhlükəsizliyi sistemlərinin vacib tərkib hissəsidir. Perimetrin mühafizəsi ilə əlaqəli təhlükə risklərinin qiyətləndirilməsində ən vacib yanaşmalardan biri riskin modelləşdirilməsidir və aşağıda bu istiqamət üzrə Bir sıra araşdırmaların nəticələri verilir [2].

Göstərilmişdir ki, bir sıra tədqiqatçılar tərəfindən 11 sentyabr 2001-ci il tarixində qüvvədə olan təhlükəsizlik prosedurlarına uyğun olaraq səmşinlərin yoxlanılması ilə bağlı terror aktının

aşkar edilməsinin şərti ehtimalının (Q) qiymətləndirilməsi (1) -də verilmiş düsturdan istifadə olunmaqla təsvir edilə bilər:

$$Q = P \cdot H + (1 - P) \cdot L, \quad (1)$$

burada P seçilmiş şəxsin terrorçu kimi təsnif edilməsi ehtimalıdır; H seçilmiş skrininqin hücumu aşkar edəcəyinin şərti ehtimalıdır; L - seçilməmiş skrininqin hücumu aşkar etməsinin şərti ehtimalıdır.

Bu mənbə [2] onu da qeyd edir ki, ilkin yoxlamanın məqsədi P ehtimalını maksimuma çatdırmaq kimi görünür, halbuki sistemin xüsusiyyətlərini nəzərə alaraq, əvvəlcədən yoxlama sisteminin həm H, həm də L-ni dəyişdirə və sənişinlərin yoxlanılmasının ümumi səmərəliliyini azalda biləcəyi göstərilir. Buna görə də, ilkin yoxlama yalnız müəyyən şəraitdə aviasiya təhlükəsizliyini təkmilləşdirə bilər və onun təhlükəsizlik diqqətinin çoxsaylı komponentlərdən birinə köçürülməsi tövsiyə olunur. Buna görə də, riskə əsaslanan sənişinlərin yoxlanılması sistemlərinin səmərəliliyi daha da araşdırılmalıdır. Qeyd olunur ki, sənişinlər yüksək riskli (P ehtimalı ilə) və ya aşağı riskli (R ehtimalı ilə) qəbul edildiyi üçün təsadüfi seçilən aşağı riskli sənişinlər kimi qəbul edildiyi üçün seçilmiş (terrorçu kimi) kimi təsnif edilə bilər.

(1)-də verilmiş düsturdan istifadə edərək, bir hücumun uğurlu olmasının şərti ehtimalı (2) düsturu ilə hesablanı bilər:

$$Q = (1 - P) \cdot (1 - R) \cdot (1 - L) + (P + (1 - P) \cdot R) \cdot (1 - H). \quad (2)$$

Elmi ədəbiyyatda risklər təhlükələrin identifikasiyası əsasında müəyyən edilir və bununla da belə təhlükələrdən yaranan nəticələrin ehtimalı qiymətləndirilir. Risk isə (3) və (4) düsturlarındakı nisbət kimi müəyyən edilə bilər [3]:

$$R_i = K_i \cdot Q_i, \quad (3)$$

$$Q_i = Q_i^* \cdot (1 - P_i), \quad (4)$$

burada  $R_i$  – qeyri-qanuni müdaxilənin  $i$  tipli təhlükəsi ilə bağlı riskin miqdarı;  $K_i$  – qeyri-qanuni müdaxilənin  $i$  tipli təhlükə dərəcəsi;  $Q_i$  –  $i$  tipli qeyri-qanuni müdaxilə ehtimalı;  $i$  – qeyri-qanuni müdaxilənin növünün identifikatoru ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ );  $Q_i^*$  –  $i$  tipli qeyri-qanuni müdaxilənin həyata keçirilməsi cəhdinin ehtimalı (pozuçu tərəfindən qeyri-qanuni müdaxilənin obyektinin və növünün seçilməsi);  $P_i$  – obyekt qeyri-qanuni müdaxilədən qorumaq üçün sistem tərəfindən  $i$  tipli qeyri-qanuni müdaxilənin və/və ya onun mənfi nəticələrinin qarşısının alınması ehtimalı.

(3) və (4) düsturlarından (5) ifadəsini almaq olar:

$$R_i = K_i \cdot Q_i^* \cdot (1 - P_i), \quad (5)$$

(5) düsturunda  $K_i \cdot Q_i^*$ - məhsulu  $i$  tipli qeyri-qanuni müdaxilə aktının baş verməsindən asılı olaraq aviasiya təhlükəsizliyinə təhlükəni xarakterizə edir. Multiplikator  $(1 - P_i)$   $i$  tipli qeyri-qanuni müdaxilə aktının törədilməsinin qarşısını almamaq ehtimalını, yəni qorunan obyektin  $i$  tipli qeyri-qanuni müdaxilə aktının həyata keçirilməsinə həssaslığını göstərir.  $Q_i^* \cdot (1 - P_i)$  məhsulu obyektin təhlükəsizlik sisteminin müqaviməti qarşısında  $i$  tipli qeyri-qanuni müdaxilə aktının törədilməsinin (törətməyə cəhdin) şərti ehtimalına uyğundur.

Məlumdur ki, hava limanlarının perimetrinin etibarlı mühafizəsi probleminin həllində əsas optimallaşdırma metodu potensial müdaxilə edənlərin müxtəlif aşkarlama vasitələrinin birgə tətbiqi əsasında müəyyən edilə bilər.

Aeroportun perimetrinin qeyri-qanuni müdaxilə aktlarına məruz qalması ilə mübarizə üçün hər hansı inteqrasiya edilmiş sistemin effektivliyi bir sıra nəzarət xətlərini təşkil edən müxtəlif aşkarlama vasitələri və üsullarının parametrlərindən asılıdır. Perimetr üzrə monitoring prosesi

zamanı qeyri-qanuni müdaxilənin mümkünlüyü barədə etibarlı məlumat əldə etmək lazımdır. Bu halda, aşkarlamanın yüksək etibarlılığını təmin etmək lazımdır və istifadə olunan aşkarlama avadanlığının yanlış həyəcan siqnalları ehtimalına daha az sət tələblər qoyulur. Yuxarıda göstərilmiş müddəalar əsasında hava limanlarının perimetrinə baxış prosedurlarında qeyri-qanuni müdaxilə aktlarının aşkar edilməsi zamanı təhlükə risklərinin qiymətləndirilməsi məsələsi araşdırılmışdır.

Bu məqsədlə ilk öncə [4]-də verilmiş elmi mənbədə hava limanının perimetrinin monitorinqinin iki baxış sistemindən keçən ssenariyə analoji olan perimetrin pozulmasının iki müxtəlif üsulla aşkar edilməsi ssenarisinə baxılmışdır. Bu halda perimetrə qeyri-qanuni müdaxilənin aşkarlanması üçün istifadə olunan videomüşahidə qurğularının və mühafizə hasarlarının düzgün və yanlış həyəcan siqnalının verilməsinin ortalaşdırılmış ehtimalı müvafiq olaraq (6) və (7) düsturlarları ilə hesablanı bilər:

$$P_{a\bar{s}1} = P_{a\bar{s}}^{Vid-m\bar{u}} \cdot P_{a\bar{s}}^{Ptrl}, \quad (6)$$

$$P_{yhs1} = P_{yhs}^{Vid-m\bar{u}} \cdot P_{yhs}^{Ptrl}, \quad (7)$$

burada  $P_{a\bar{s}}^{Vid-m\bar{u}}$  -videomüşahidə kamerası ilə pozucunun aşkar edilməsi ehtimalı;  $P_{a\bar{s}}^{Ptrl}$  -patrul xidməti ilə pozucunun müdaxiləsinin aşkar edilməsi ehtimalı;  $P_{yhs}^{Vid-m\bar{u}}$  - videomüşahidə kamerası vasitəsilə monitorinq zamanı yanlış həyəcan siqnallarının verilməsi ehtimalı;  $P_{yhs}^{Ptrl}$  - mühafizə hasarı sistemi ilə qeyri-qanuni müdaxilənin aşkar edilməsi zamanı yanlış həyəcan siqnalının verilməsi ehtimalı.

Məsələn, [2]-də verilən məlumatlara görə yuxarıda nəzərdən keçirilən ehtimalların qiymətlərinin aşağıdakı kimi olduğunu göstərmək olar:

$$P_{a\bar{s}}^{Vid-m\bar{u}} = 0.909 \quad P_{a\bar{s}}^{Ptrl} = 0.95; \quad P_{yhs}^{Vid-m\bar{u}} = 0.50; \quad P_{yhs}^{Ptrl} = 0.20.$$

(6) və (7) düsturlarının köməyi ilə iki mərhələli mühafizə sisteminin komponentlərinin parametrlərinin təsirini müəyyən etmək üçün müvafiq hesablamalar aparılmışdır. Bu məqsədlə təhlükəsizlik kompleksinin xüsusiyyətlərinin onun komponentlərinin müxtəlif dəyərlərindən asılılığını hesablamaq üçün bu xüsusiyyətlərin müxtəlif ssenariləri verilə bilər. Bu əsasda aparılan hesablamaların nəticələri cədvəl 1-də verilmişdir.

Cədvəl 1

Videomüşahidə sistemləri və patrul xidmətinin fəaliyyəti əsasında mühafizənin təşkili zamanı pozucunun aşkar edilməsi və yanlış həyəcan siqnallarının ehtimallarının hesablanmış qiymətləri

| $P_{a\bar{s}}^{Vid-m\bar{u}}$ | $P_{yhs}^{Vid-m\bar{u}}$ | $P_{a\bar{s}}^{Ptrl}$ | $P_{yhs}^{Ptrl}$ | $P_{a\bar{s}1}$ | $P_{yhs1}$ |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|------------|
| 0,909                         | 0,50                     | 0,95                  | 0,20             | 0,86            | 0,1        |
| 0,909                         | 0,50                     | 0,96                  | 0,20             | 0,87            | 0,1        |
| 0,914                         | 0,64                     | 0,97                  | 0,20             | 0,88            | 0,58       |
| 0,914                         | 0,64                     | 0,98                  | 0,20             | 0,89            | 0,59       |
| 0,914                         | 0,64                     | 0,99                  | 0,20             | 0,90            | 0,60       |
| 0,914                         | 0,64                     | 0,99                  | 0,50             | 0,90            | 0,60       |
| 0,917                         | 0,74                     | 0,99                  | 0,50             | 0,90            | 0,71       |
| 0,917                         | 0,74                     | 0,99                  | 0,50             | 0,90            | 0,71       |

Cədvəl 1 göstərir ki, videomüşahidə sistemi ilə mühafizə zamanı yanlış siqnalların ( $P_{yhs}^{Vid-m\bar{u}}$ ) olma ehtimalı artdıqca, mühafizə kompleksi tərəfindən qeyri-qanuni müdaxilənin aşkarlanması ehtimalı artır, lakin eyni zamanda, kompleks tərəfindən yanlış siqnalların verilməsi ehtimalı da artır.

Burada qeyd etmək lazımdır ki, 1 ehtimalı olan nəzarət obyektı haqqında məlumat alınarkən həmin obyektə müdaxilə edən şəxsin olmasını nəzərə almaqla, videomüşahidə sistemlərindən istifadə etməklə həmin ərazinin hərtərəfli təhlilinin aparılması məqsədəuyğundur. Bu halda, perimetrin müdaxilə zonasında təcavüzkarın aşkarlanması ehtimalı 0,917-0,99 olacaq.

Yuxarıda göstərilənləri nəzərə alaraq, üç mərhələli təhlükəsizlik sisteminin komponentlərinin parametrlərinin təsirini müəyyən etmək üçün hesablamalar da aparılmışdır. Bu halda, təhlükəsizlik kompleksinin xüsusiyyətlərinin onun komponentlərinin müxtəlif dəyərlərindən asılılığını hesablamaq üçün bu xüsusiyyətlərin müxtəlif ssenarilərini vermək olar. Təhlükəsizliyin təmin edilməsinin kompleks tədbiri ilə icazəsiz şəxsin ( $P_{aş2}$ ) və yanlış həyəcan signalının ( $P_{yhs2}$ ) aşkarlanması ehtimalları (8) və (9) düsturları ilə müəyyən edilə bilər:

$$P_{aş2} = P_{aş}^{IQ} \cdot P_{aş}^{Vid-mü.} \cdot P_{aş}^{Ptrl}, \quad (8)$$

$$P_{yhs2} = P_{yhs}^{IQ} \cdot P_{yhs}^{Vid-mü.} \cdot P_{yhs}^{Ptrl}, \quad (9)$$

burada  $P_{aş}^{IQ}$  -infraqırmızı mühafizə sisteminin müdaxiləni törədən şəxsin düzgün aşkar edilməsi ehtimalı;  $P_{aş}^{Vid-mü.}$ -videomüşahidə sistemi ilə pozucunu düzgün aşkar edilməsi ehtimalı;  $P_{aş}^{Ptrl}$ -patrul xidmətinin pozucunu düzgün aşkar edilməsi ehtimalı;  $P_{yhs}^{IQ}$  - infraqırmızı mühafizə sistemin müdaxiləni törədən şəxsi aşkarlayan zaman yanlış həyəcan signalının verilməsi ehtimalı;  $P_{yhs}^{Vid-mü.}$  - videomüşahidə sistemi ilə pozucunu aşkarlanması zamanı yanlış həyəcan signalının verilməsi ehtimalı;  $P_{yhs}^{Ptrl}$  - patrul xidmətinin pozucunu aşkarlayan zaman yanlış həyəcan signalının verilməsi ehtimalı.

Cədvəl 2 təhlükəsizlik kompleksinin komponentlərinin parametrlərindən asılı olaraq bu kompleksin müdaxiləçiləri və yanlış həyəcan signalının aşkarlanması ehtimalının hesablanmış dəyərlərini təqdim edir.

Cədvəl 2  
Mühafizə kompleksinin pozucunu aşkar edilməsi və yanlış həyəcan signalının ehtimallarının hesablanmış qiymətləri

| $P_{aş}^{IQ}$ | $P_{yhs}^{IQ}$ | $P_{aş}^{Vid-mü.}$ | $P_{yhs}^{Vid-mü.}$ | $P_{aş}^{Ptrl}$ | $P_{yhs}^{Ptrl}$ | $P_{aş2}$ | $P_{yhs2}$ |
|---------------|----------------|--------------------|---------------------|-----------------|------------------|-----------|------------|
| 0,912         | 0,05           | 0,90               | 0,10                | 0,80            | 0,20             | 0,65      | 0,0010     |
| 0,912         | 0,06           | 0,91               | 0,10                | 0,85            | 0,20             | 0,70      | 0,0012     |
| 0,917         | 0,08           | 0,92               | 0,15                | 0,90            | 0,15             | 0,72      | 0,0018     |
| 0,917         | 0,10           | 0,93               | 0,15                | 0,90            | 0,15             | 0,76      | 0,0023     |
| 0,922         | 0,15           | 0,94               | 0,20                | 0,95            | 0,10             | 0,82      | 0,0030     |
| 0,923         | 0,20           | 0,95               | 0,20                | 0,96            | 0,10             | 0,84      | 0,0040     |
| 0,924         | 0,20           | 0,96               | 0,20                | 0,97            | 0,10             | 0,86      | 0,0040     |
| 0,925         | 0,30           | 0,98               | 0,25                | 0,98            | 0,05             | 0,88      | 0,0038     |
| 0,926         | 0,30           | 0,98               | 0,30                | 0,99            | 0,05             | 0,89      | 0,0045     |
| 0,927         | 0,30           | 0,99               | 0,30                | 0,99            | 0,05             | 0,90      | 0,0045     |

### Ədəbiyyat

1. Шаров, В.Д. (2016). *Методология управления риском безопасности полетов на уровне авиапредприятия* (Автореферат диссертации доктора технических наук). Московский

- государственный технический университет гражданской авиации.  
[https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_006646788/?ysclid=mfdj1qjrpg229708335](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006646788/?ysclid=mfdj1qjrpg229708335)
2. McLay, L.A. (2011). *Risk-Based Resource Allocation Models for Aviation Security*. Safety and Risk Modeling and Its Applications. Springer Series in Reliability Engineering. DOI: 10.1007/978-0-85729-470-8\_9,
  3. Прозоров, С.Е., Вербин, А.В. *Оценка угрозы и управление риском в авиационной безопасности*// Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 78. [www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/)
  4. Илькухин, Н. Ю. (2016). *Исследование технологий детектирования взрывчатых веществ в процедурах обеспечения авиационной безопасности* (Диссертация кандидата технических наук). Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации. [https://spbguga.ru/files/Diss\\_Ilkuhin.pdf](https://spbguga.ru/files/Diss_Ilkuhin.pdf)

## ASSESSMENT OF SECURITY RISKS ASSOCIATED WITH AIRPORT PERIMETER PROTECTION

Surkhay S.H., Shamil B.E.

**Abstract.** *Risk refers to the likelihood of a specific threat occurring and its potential impact on people and economic losses. In aviation security, risk is not only associated with the protection of airport terminal buildings and the detection of potential threats, but also with the safeguarding of the perimeter and the identification of unauthorized intrusions.*

*One of the most crucial approaches in airport perimeter protection is risk modeling. Risk assessment is carried out by analyzing the frequency and probability of various threats. To detect unauthorized intrusions at airport perimeters, it is essential to integrate different detection methods and accurately evaluate the parameters of these systems.*

**Keywords:** *risk, perimeter, vibration protection, video surveillance cameras, infrared protection*



## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В АВИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ: АВТОМАТИЗАЦИЯ ДОСМОТРА ПассаЖИРОВ И БАГАЖА



**Лобода Д.И.**

Национальная Академия Авиации, Баку, Азербайджан  
dloboda@naa.edu.az

**Аннотация.** Статья посвящена анализу применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в сфере авиационной безопасности, с особым акцентом на автоматизацию процессов досмотра пассажиров и их багажа. В условиях роста пассажиропотока, эволюции террористических угроз и ограничений традиционных методов контроля, использование ИИ становится стратегически важным направлением развития авиационной отрасли.

Рассматриваются основные проблемы существующих подходов к обеспечению безопасности, включая зависимость от человеческого фактора, ограниченную пропускную способность и субъективность оценки поведения. На этом фоне ИИ предлагает качественно новые решения - от анализа изображений с рентгеновских сканеров до распознавания лиц и поведенческих аномалий, что позволяет повысить точность, скорость и эффективность процедур досмотра.

В заключение обсуждаются перспективы развития - расширение применения глубокого обучения, адаптивных систем и международного сотрудничества. ИИ представляется не заменой человеку, а его надёжным партнёром в построении устойчивой и безопасной авиационной среды.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, авиационная безопасность, досмотр пассажиров, поведенческий анализ, автоматизация процессов.

**Введение.** Сфера гражданской авиации неизменно остаётся объектом повышенного внимания в контексте обеспечения безопасности. Возрастающие угрозы терроризма, попытки провоза запрещённых предметов, а также ошибки человеческого фактора делают задачи обеспечения авиационной безопасности всё более сложными и многогранными. На этом фоне современные технологии, в особенности искусственный интеллект (ИИ), приобретают особую значимость.

ИИ способен радикально изменить подход к обеспечению безопасности в аэропортах, предоставляя более точные, быстрые и надёжные способы контроля и анализа. Особенно важное значение он приобретает в процессе досмотра пассажиров и их багажа - одной из ключевых стадий фильтрации потенциальных угроз.

Современные аэропорты превращаются в сложные технологические узлы, где каждый элемент инфраструктуры должен взаимодействовать с высокотехнологичными системами. ИИ позволяет обеспечить беспрецедентный уровень координации между различными службами, включая службу безопасности, таможенные органы и авиакомпании. Таким образом, ИИ становится не только техническим решением, но и стратегическим фактором устойчивого развития отрасли.

**Методы исследования.** На протяжении десятилетий в аэропортах применяются различные формы контроля: досмотр, рентгеновское сканирование, металлодетекторы, выборочная проверка, а также собеседования с пассажирами. Несмотря на многочисленные

усовершенствования, традиционные методы имеют ряд ограничений:

1. Человеческий фактор. Сотрудники могут переутомляться, ошибаться, терять концентрацию, что снижает эффективность досмотра.
2. Скорость обработки. Рост пассажиропотока требует автоматизации; человек физически не может обрабатывать сотни изображений в минуту.
3. Ограниченная пропускная способность. Узкие места в системе могут создавать задержки, приводящие к накоплению очередей и недовольству пассажиров.
4. Субъективность оценки поведения. Психологическое восприятие и культурные различия могут влиять на интерпретацию поведения пассажиров [1].

Кроме того, традиционные методы не всегда эффективны против новых видов угроз, таких как миниатюрные электронные устройства, скрытые биологические или химические вещества.

Современные ИИ-системы способны взять на себя значительную часть задач, ранее выполнявшихся исключительно людьми. Основные направления применения включают:

1. Анализ изображений с рентгеновских и томографических сканеров. ИИ может обнаружить неочевидные угрозы: замаскированное оружие, необычные конфигурации предметов, спрятанные в двойных стенках. Алгоритмы обучаются на тысячах изображений, постоянно улучшая точность и снижая число ложных тревог.
2. Биометрическая идентификация. Системы распознавания лиц и радужной оболочки глаза обеспечивают быстрое прохождение контроля. Биометрические данные могут сопоставляться с базами данных, включая списки запрещённых к перелёту лиц.
3. Анализ поведенческих паттернов. ИИ способен анализировать микродвижения тела, выражение лица, направление взгляда. Это помогает выявить потенциальную угрозу ещё до момента посадки на рейс.
4. Интеграция с Big Data. ИИ анализирует историю путешествий, поведение в предыдущих поездках, финансовую активность – всё это формирует индивидуальный риск-профиль пассажира [2].

Многие международные аэропорты уже начали активное внедрение ИИ в процессы досмотра и идентификации:

- Лондон - аэропорт Хитроу (Heathrow): автоматический досмотр багажа, биометрическая посадка, использование камер с ИИ для мониторинга поведения.
- Аэропорт Дубай: полная автоматизация пограничного контроля с применением распознавания лиц и отпечатков пальцев.
- США - TSA Innovation Task Force: пилотные проекты в Лос-Анджелесе, Атланте, Бостоне с интеграцией ИИ в досмотровые зоны.
- Китай — аэропорт Пудун (Шанхай): ИИ управляет потоками, анализирует изображения багажа, прогнозирует скопления и перенаправляет пассажиров.

Эти примеры демонстрируют потенциал ИИ не только для обеспечения безопасности, но и для повышения общего качества обслуживания пассажиров.

**Результаты и обсуждение.** Внедрение ИИ в процедуры досмотра приносит многочисленные преимущества:

- Сокращение времени досмотра: автоматическая проверка данных и багажа занимает считанные секунды.
- Повышение точности: ИИ не подвержен усталости, не отвлекается, не допускает субъективной оценки.
- Оптимизация работы персонала: сотрудники направляют усилия на решение нестандартных ситуаций.

- Улучшение имиджа аэропорта: высокий уровень технологичности формирует доверие у пассажиров.

Важно отметить, что пассажиры, прошедшие через автоматизированную систему досмотра, чаще сообщают о высоком уровне удовлетворённости качеством сервиса.

ИИ в авиационной безопасности, это не временное новшество, а долгосрочная трансформация отрасли.

Будущее включает:

- Расширение использования технологий глубокого обучения, в том числе мультиспектрального анализа изображений.

- Внедрение адаптивных систем, которые настраиваются под конкретные угрозы в конкретных регионах.

- Повышение роли ИИ в системах управления инцидентами.

- Интеграция ИИ с другими цифровыми платформами: логистика, медицина, экстренное реагирование [3].

Ожидается появление международных платформ для обмена ИИ-моделями между странами в рамках борьбы с глобальными угрозами.

Искусственный интеллект открывает новые горизонты в обеспечении авиационной безопасности, особенно в ключевом аспекте - досмотре пассажиров и багажа. Уже сегодня ИИ позволяет значительно ускорить процесс проверки, снизить нагрузку на персонал, повысить точность выявления угроз и сделать путешествия более безопасными и комфортными.

Однако внедрение ИИ требует ответственности, прозрачности и сбалансированности. Только при соблюдении этических норм, защите прав пассажиров и поддержке со стороны государства технологии смогут реализовать весь свой потенциал.

ИИ не заменяет человека - он становится его помощником, усиливая безопасность, надёжность и устойчивость авиационной системы в условиях быстро меняющегося мира.

### Литература

1. De Gruyter Brill. (2022). *Fatigue management in ramp workers* [Article]. ENG-journal. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0411>
2. Vukadinovic, D., & Anderson, D. (2022). *X-ray baggage screening and artificial intelligence (AI): A technical review of machine learning techniques for X-ray baggage screening*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/46363>
3. Suraj, C., Malyada, A., Anjali, B., Bhagavan, R., Vardhan, H., & Karrothu, A. (2023). Analysis on airport security of baggage screening using deep learning. *Applied and Computational Engineering*, 4, 260–266. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/4/20230462>.

### ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AVIATION SECURITY: AUTOMATION OF PASSENGER AND BAGGAGE SCREENING

Loboda D.I.

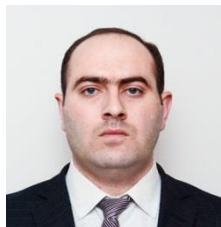
**Abstract.** The article is devoted to the analysis of the application of artificial intelligence (AI) technologies in the field of aviation security, with a special focus on the automation of passenger and baggage screening processes. With the growth of passenger traffic, the evolution of terrorist threats and the limitations of traditional control methods, the use of AI is becoming a strategically important area for the development of the aviation industry.

*The main problems of existing approaches to ensuring security are considered, including dependence on the human factor, limited bandwidth and subjectivity of behavior assessment. Against this background, AI offers qualitatively new solutions, from image analysis from X-ray scanners to facial recognition and behavioral anomalies, which improves the accuracy, speed and efficiency of screening procedures.*

*In conclusion, the prospects for development are discussed — the expansion of the use of deep learning, adaptive systems and international cooperation. AI does not seem to be a substitute for humans, but rather their reliable partner in building a sustainable and safe aviation environment.*

**Keywords:** artificial intelligence, aviation security, passenger screening, behavioral analysis, process automation.

## AVIASIYA TƏHLÜKƏSİZLİYİNİN TƏMİN EDİLMƏSİNDƏ SÜNİ İNTELLEKT TEKNOLOGİYASININ TƏTBİQİ



**Rüstəmov R.R.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
rrustamov@naa.edu.az



**İsmayılova S.R.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
senemismayilova845@gmail.com

**Xülasə.** Məqalədə, süni intellektin mülki aviasiyada tətbiq sahələri, o cümlədən sərnişinlərin identifikasiyası, baqajın yoxlanılması, əməliyyatların optimallaşdırılması və təhlükəsizlik səviyyəsinin yüksəldilməsi məsələləri təhlil edilmişdir. Təhlillər əsasında müəyyən edilmişdir ki, süni intellektin düzgün tətbiqi ilə hava limanlarında həm aviasiya təhlükəsizliyinin təkmilləşdirməsinə, həm də sərnişin məmnuniyyətinin artırılmasına nail olmaq mümkündür.

**Açar sözlər:** aviasiya təhlükəsizliyi, aeroport, süni intellekt, potensial təhlükəli hallar, sərnişin, baqaj

**Giriş.** Aviasiyada qanunsuz müdaxilə aktlarının qarşısını almaq və fəaliyyəti təkmilləşdirmək üçün süni intellekt (Sİ) texnologiyasının tətbiqinə ehtiyac duyulur [1,2]. Sİ, rəqəmsal kompüter vasitəsilə idarə olunan robotlarla əlaqəli vəzifələri yerinə yetirir. Termin əsasən mülahizə yürütmək, təhlillər aparmaq, ümumiləşdirmək və ya keçmiş təcrübədən öyrənmək qabiliyyəti kimi insanlara xas olan intellektual proseslərlə təchiz edilmiş sistemlərin inkişafı və layihələndirilməsində tətbiq edilir [3].

Məqalədə məqsəd, aviasiya təhlükəsizliyinin təmin edilməsində süni intellekt texnologiyasının tətbiqini təhlil etməklə, onun üstünlüklərini müəyyənləşdirməkdən ibarətdir.

Mütəxəssislər ümumiyyətlə insan zəkasını yalnız bir əlamətlə deyil, bir çox müxtəlif qabiliyyətlərin birləşməsi ilə xarakterizə edirlər. Sİ-nin əsas məqsədi insanların dünyanı necə qavradığını və ona necə reaksiya verdiyini təhlil edərək insanın qabiliyyətini təkmilləşdirmək və töhfə verməkdir. Sİ insan beyninin maşınlarda yerinə yetirdiyi funksiyaları müxtəlif aspektlərdə təqlid etməyə çalışan elm sahəsidir. Sİ sahəsində aparılan tədqiqatlar əsasən zəkanın aşağıdakı komponentlərinə fokuslanmışdır [4]:

- öyrənmə;
- düşünmə;
- problemi həlletmə;
- qavrayış;
- dildən istifadə və s.

Sİ kimi düşünmək və onların hərəkətlərini təqlid etmək üçün proqramlaşdırılmış maşınlarda insan intellektinin simulyasiyasına aiddir. Süni intellektin ideal xüsusiyyəti onun rasionallaşdırmaq



və konkret məqsədə çatmaq üçün müvafiq hərəkətlər etmək qabiliyyətidir. Sİ-nin alt dəsti kompüter proqramlarının insanların köməyi olmadan avtomatik olaraq, yeni məlumatlardan öyrənə və onlara uyğunlaşa biləcəyi konsepsiyaya istinad etməsidir. Mətn, şəkillər və ya video kimi strukturlaşdırılmamış çoxlu məlumatların mənimsənilməsi vasitəsilə bu avtomatik öyrənməyə imkan verir.

Sİ insan intellektinin maşınlarda simulyasiyasına aiddir. Onun məqsədlərinə öyrənmə, düşünmə və qavrayış daxildir. Zəif Sİ intellekt sadə və tək tapşırıq yönümlü olmağa meyllidir, güclü süni intellekt isə daha mürəkkəb və insana bənzər tapşırıqları yerinə yetirir. Sİ maliyyə və səhiyyə də daxil olmaqla, hava nəqliyyatında da istifadə olunur.

Texnologiya inkişaf etdikcə, Sİ-ni müəyyən edən əvvəlki meyarlar köhnəlir. Sİ bir çox müxtəlif sənayelərə fayda vermək üçün davamlı olaraq inkişaf edir. Sİ texnologiyaları hava yolu əməliyyatlarının idarə edilməsinin müxtəlif aspektləri üçün faydalıdır.

Sİ, sənişinlərin və baqajın təhlükəsizliyində insan səhvinin azaldılmasına imkan yaradır [5]. BU texnologiyanın hava limanının idarə edilməsinə üstünlükləri aşağıdakılardan ibarətdir [6,7]:

1. Fəaliyyətin effektivliyinin təkmilləşdirilməsi;
2. Məntiqi qərarların qəbul edilməsi;
3. Təhlükəsizlik tədbirlərinin təkmilləşdirilməsi;
4. Sənişinlərdə vərdişlərin formalaşdırılması;
5. Xərclərin azaldılması;
6. Birgə və əlaqəli fəaliyyətin təşkil edilməsi və s.

Hava limanları üçün təhlükəsizlik həmişə əsas məsələ olmuşdur. Hava limanları müntəzəm olaraq, kiçik insidentlərdən həyat üçün təhlükə yaradan təhlükəsizlik hücumlarına qədər çoxsaylı təhlükələrlə üzləşir. Təhlükəsizliyin yüksək səviyyədə təmin edilməsi xüsusilə artan sənişin həcmi ilə çətin bir missiyadır. Bu, bütün riskləri azaltmaq üçün kompleks təhlükəsizlik sistemlərinin tətbiqini tələb edir. Son illərdə təhlükəsizlik tələbləri əhəmiyyətli dərəcədə güclənmiş və hava limanlarında preventiv təhlükəsizlik tədbirləri görməyə məcbur etmişdir. Bundan əlavə, xidməti personal, sənişinlər, yola salanlar, qarşılayanlar və s. yüksək səviyyəli rahatlıq gözləyirlər ki, bu da aviaşirkətlər üçün əlavə bir problem deməkdir [3, 8]. Aviaşirkətlər aviasiya təhlükəsizliyini yüksək səviyyədə təmin etməklə yanaşı, səmərəliliyi artırmağa və bütün əməliyyat prosesini qüsursuz təşkil etməyə çalışır.

Potensial təhlükəli halların aşkarlanması əsasən aviasiya təhlükəsizliyi sahəsində istifadə edilən xüsusi texniki vasitələrdən informasiyanın əldə edilməsinə əsaslanır. Avtomatlaşdırılmış bu vasitələrdən əldə edilən təsvirlərin keyfiyyətinin artırılması və operatora potensial təhlükəli halların dərhal bildirilməsi, eləcə də müvafiq qərarların qəbul edilməsi aviasiya təhlükəsizliyinin yüksək səviyyədə təmin edilməsinə imkan yarada bilər.

**Aviasiya təhlükəsizliyində nəzarət zamanı informasiyanın optimallaşdırılması** [1,8]. Hava limanının təhlükəsizliyi üçün əsas məsuliyyət hava limanı mühitində sənişinlərin və xidməti personalın təhlükəsizliyini təmin etməkdir. Buna görə də etibarlı videomüşahidə sisteminin tətbiq edilməsi vacibdir. Hava limanlarında müşahidələrin aparılması müəyyən problemlər yarada bilər. Çünki hava limanından gün ərzində minlərlə sənişin istifadə edir. Ərazinin böyük olması müşahidə məsələsini biraz da çətinləşdirir. Deməli, bütün ərazini izləmək üçün operatorlar gecə-gündüz yüzlərlə kameraya baxmalıdırlar. İnsanın imkanları diqqəti yayındırmadan və səhv etmədən bunu etməyə imkan vermir. Operatorların bəzən diqqətindən yayına bilər ki, bu da potensial təhlükəli halların nəzərdən qaçmasına, eləcə də hər bir halın diqqətlə təhlil edilə bilməməsinə səbəb olur.

Sİ texnologiyası bu problemləri həll etməyə və real vaxt rejimində potensial təhlükəli hallarla bağlı operatora xəbərdarlıq etməklə videomüşahidəni optimallaşdırmağa imkan yaradır. Bu texnologiya, operatorların potensial təhlükəli hallara dərhal diqqət yetirmələrinə şərait yaradır

(Şəkil 1). Sİ təhlükəsizlik təhdidlərinin real vaxt rejimində tanınması üçün passiv kameraları proaktiv təhlükəsizlik sistemlərinə çevirməyə kömək edir.

**Hava limanlarına qanunsuz girişə nəzarətin təmin edilməsi** [3,4]. Ölçülərinə, çoxsaylı giriş nöqtələrinə və çoxlu insan kütləsinə görə hava limanları müəyyən qanunsuz müdaxilə aktlarına məruz qala bilər. Hava limanı terminalındakı izdiham, eləcə də idarəetmə qüllələri kimi kritik obyektlər terrorçuların hədəfinə çevrilmək riski altındadır.



**Şəkil 1.** Sİ texnologiyasına əsaslanan videomüşahidə sistemi vasitəsilə nəzarətin təşkil edilməsi

Girişə nəzarət hava limanı təhlükəsizliyinin ayrılmaz hissəsidir. Aerodrom, hava hərəkətinə nəzarət qüllələri və ya anqarlar kimi həssas ərazilərə girişi idarə etmək vacibdir. Eyni zamanda, şirkət işçilərinin, xidmət təminatçıların və çoxsaylı kommersiya satıcılarının müəyyən vaxtlarda hava limanının müəyyən ərazilərinə çıxışının olmasını və sərnəşin axınının rəvan və problemsiz getməsinə təmin etmək lazımdır. Bu, qanuni və icazəsiz ziyarətçiləri ayırd etmək üçün nəzərdə tutulmuşdur. İtirilə, oğurlana və ya borc götürülə bilən buraxılış vərəqələrindən fərqli olaraq, biometrik giriş nəzarəti, xüsusən də üz tanınması daha təhlükəsiz görünür. İcazəsiz giriş aşkar edilərsə, sistem real vaxt rejimində operatorlara xəbərdarlıq edir.

İcazəsiz girişin qarşısının alınması, habelə müdaxilə edənlərin real vaxt rejimində aşkarlanması, şübhəsiz ki, hava limanının operatorları üçün ən aktual təhlükəsizlik problemlərindəndir. Çünki izdihamın içərisində silahlı şəxslərin aşkar edilməsi çətinliklər yarada bilər. Ona görə də mühüm hadisələri nəzərdən qaçıрмаq olar. Sİ texnologiyaları bu çətinliklərin öhdəsindən gəlməyə kömək edə bilər və insanlara təhlükələri erkən aşkar etməkdə dəstək ola bilər. Bu texnologiyalar şübhəli obyektləri və ya şəxsləri müəyyən edərək izləyən çoxsaylı kameralar vasitəsilə 24/7 hava limanının bütün ərazisini izləyir. Qanunsuz daxilolmalar və potensial təhlükəli hallarla bağlı dərhal xidməti personala xəbərdarlıq göndərilir.

**Fəaliyyətin tənzimlənməsi** [4,7]. Hava limanlarının xüsusi ərazilərində sıxlıq və ya tıxac yaranır. Bu hava limanı üçün arzuolunan hal deyildir. Çünki boşuna sərf olunan hər bir dəqiqə müntəzəmliyin pozulmasına və aviaşirkətlər üçün maliyyə itkilərinə səbəb ola bilər. Uçuşlar gecikərsə, bronlaşdırma xərcləri yenidən aviaşirkətlər tərəfindən ödənilməlidir. Hava limanları, sərnəşin uzun növbələrdə dayanmaq məcburiyyətində qalmaqda qaldıqları təqdirdə alış-veriş və ya əyləncə zonasında xərcləyəcəkləri pulları da itirirlər. Qlobal hava limanı gəlirlərinin təxminən 40%-i qeyri-aerokosmik gəlirlərdən əldə edilir ki, bu da pərakəndə satış sahəsinin hava limanlarının maliyyə sabitliyinə mühüm töhfə verdiyini göstərir.

Hava limanları Sİ texnologiyasından istifadə etməklə növbələrdə gözləmə müddətini azalda və buna görə də sərnəşin təcrübəsini artırma bilər. Bu texnologiya hava limanında fəaliyyəti izləyə və təhlil edə bilər.

Üz tanıma texnologiyası tətbiq edilərsə, sərnişinlər hava gəmisinə daxil olarkən, onların sənədlərinin yoxlanılmasına ehtiyac qalmır. Sərnişinlər təhlükəsizlik baxımından yoxlamadan keçərkən, üz tanıma sistemi vasitəsilə yoxlanıla bilər. Bu, təhlükəsizlik üçün lazım olan vaxt müddətini və növbələri azalda və hava limanlarının daha effektiv fəaliyyət göstərməsinə imkan yarada bilər.

**Nəzarətsiz qalmış baqajın təhlükəsizliyinin təmin edilməsi** [1,4]. Sİ texnologiyası hava limanlarında təhlükəsizlik işçiləri üçün kritik ehtiyaca çevrilən nəzarətsiz baqajın real vaxt rejimində dəqiq aşkarlanmasına imkan verir. Nəzarətsiz baqaj hava limanı üçün potensial təhlükə yarada bilər, çünki onun içərisində partlayıcı maddələrin və ya digər təhlükəli vasitələrin olma ehtimalı yüksəkdir. Bu kimi potensial hallar araşdırılmalıdır ki, bu da vaxt aparır və uçuşların gecikməsinə səbəb olur.

Sİ ilə işləyən texnologiyalar, tərk edilmiş və ya müəyyən müddət ərzində nəzarətsiz bağlamaların (və ya əşyaları) avtomatik aşkar etmək və təhlükəsizlik işçilərinə məlumat vermək üçün tətbiq edilə bilər.

Bütün bunlarla yanaşı, baqajların oğurlanması halları da müşahidə edilə bilər. Baqajın oğurlanması iddia edilərsə, Sİ ilə işləyən sistemlər oğurlanmış əşyanın yerini tez bir zamanda müəyyən edə və şübhəli şəxsin izinə düşə bilər.

**Nəticə.** Beləliklə, mülki aviasiyada süni intellekt texnologiyasının tətbiq edilməsi ilə aviasiya təhlükəsizliyini təkmilləşdirmək, sərnişin məmnunluğunu artırmaq və ümumi effektivliyi yüksəltmək mümkündür. Çünki mülki aviasiyada müvafiq riskləri nəzərə almaqla, süni intellekt texnologiyasının tətbiq edilməsi, hava limanlarında artan sərnişin həcminə uyğun fəaliyyəti təkmilləşdirmək vacib hesab edilir.

### Ədəbiyyat

1. Rustamov, R., Rustamov, A. 2023. Prospects of application of artificial intelligence technologies in ensuring aviation security. Heydər Əliyevin 100 illiyinə həsr olunmuş “Süni intellekt texnologiyaları və aerokosmik problemlər” mövzusunda I Beynəlxalq elmi-praktiki konfransın materialları, səh. 166-173. file:///C:/Users/aze/Downloads/sa1-4ni-adeqntellekt-texnologiyalara---ve-aerokosmik-problemler.-i-beynelxalq-elmi-praktik-konfrans-Yyv9pxNQ4Wiywy0E.pdf
2. Chrzęszcz, A., Ciekanowski, M., Żurawski, S., Załoga, W., Pietrzyk, S. 2024. Managing Organizational Security in the Context of Global Challenges. European Research Studies Journal, Volume XXVII, Issue 3, pp. 765-777. DOI: 10.35808/ersj/3464
3. Maksymiuk, Y., Chulinda, L., Korchova, H., Pochka, K. 2022. Priority directions of international airport infrastructure development. Strength Mater Theory Struct 109., Article 109. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.301-316>
4. Rustamov, R., İsmayılova, S. 2024. Aviasiyanın təhlükəsizliyinin idarəedilməsində süni intellektin tətbiqi imkanları. “Süni intellekt texnologiyaları və aerokosmik problemlər” mövzusunda II Beynəlxalq elmi-praktiki konfransın materialları, səh. 90-103. file:///C:/Users/aze/Downloads/son-materadegal-sadeg-2024-yanjdlov8pcdyn26-2-Aq2J1ooPORCrIRDN.pdf
5. Bankins, S., Formosa, P. 2023. The Ethical Implications of Artificial Intelligence (AI) for Meaningful Work. Journal of Business Ethics, 185, pp. 725-740. <https://doi.org/10.1007/s10551-023-05339-7>
6. Jacobson, S.H. 2019. Artificial intelligence and aviation security: Offering huge promise but not a total panacea. Transport Security International Magazine. <https://www.tsi->

mag.com/artificial-intelligence-and-aviation-security-offering-huge-promise-but-not-a-total-panacea/

7. Alards-Tomalin, D., L.Ansons, T., C.Reich, T., Sakamoto, Y., Davie, R., e-McGowan, J. P., & C.Leboe-McGowana, L. 2014. Airport security measures and their influence on enplanement intentions: Responses from leisure travelers attending a Canadian University. Journal of Air Transport Management, 37, 60-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.02.004>
8. Pik, E. 2024. Airport security: the impact of AI on safety, efficiency, and the passenger experience. J Transp Secur 17, 9. <https://doi.org/10.1007/s12198-024-00276-6>

## APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGY IN ENSURING AVIATION SECURITY

Rustamov R.R., Ismayilova S.R.

**Abstract.** *The article analyzes the areas of application of artificial intelligence in civil aviation, including passenger identification, baggage screening, optimization of operations and increasing the level of security. Based on the analysis, it was determined that with the correct application of artificial intelligence, it is possible to achieve both improvement of aviation security and increase passenger satisfaction at airports.*

**Keywords:** *aviation security, airport, artificial intelligence, potentially dangerous situations, passenger, baggage*





## HİZBULLAHIN TELEKOMMUNİKASIYA QURĞULARINDA KÜTLƏVİ PARTLAYIŞLAR YENİ MÜHARİBƏ ÜSULU VƏ KİBERMÜHARİBƏNİN BAŞLANGICIDIR



**Axundov R.Q.**

Milli Müdafiə Universitetinin Hərbi Elmi Tədqiqat İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
axundov.ramil@mmu.edu.az



**İslamov İ.C.**

Bakı Mühəndislik Universiteti, Bakı, Azərbaycan  
isislamov@beu.edu.az



**Həsənov A.Q.**

Milli Müdafiə Universitetinin Hərbi Elmi Tədqiqat İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
arzman.hesenov@mmu.edu.az



**Abdullayeva A.C.**

Milli Müdafiə Universitetinin Hərbi Elmi Tədqiqat İnstitutu, Bakı, Azərbaycan  
aynure-huseynova-2015@mail.ru

**Xülasə.** 17.09.2024 və 18.09.2024-cü il tarixlərində Livan və Suriyada Hizbullah təşkilatının telekommunikasiya qurğularında kütləvi partlayışlar baş verməsi nəticəsində 41 nəfərdən çox insan həlak olmuş, 5000 insan yaralanıb və 500-dən çox insan isə görmə qabiliyyətini itirmişdir. Günəş panelləri də daxil olmaqla, digər elektron cihazlarının partlaması da qeydə alınmışdır. İşdə kütləvi partlayışların baş verməsi səbəbləri tədqiq olunmuşdur. Müəyyən edilmişdir ki, partlayışa məruz qalan peycerlərdə ehtimal olunan partlayıcı maddə “pentaerythritol tetranitrate”dir. Riskli vəziyyətlərin ehtimal olacağını nəzərə alınaraq problem nəzəri təhlil edilmiş və bəzi maraq kəsb edən nəticələr alınmışdır:

– Qeyri empirik kvant mexaniki metodla hesablamalar aparılaraq penta erithritol tetra nitrat  $(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4\text{C}$  kimyəvi quruluşlu partlayıcı maddənin energetik parametrlərinin qiymətləri təyin edilmişdir;

–  $(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4\text{C}$  kimyəvi quruluşlu penta erithritol tetra nitrat partlayıcı maddənin mexaniki xassələri müəyyən edilmişdir;

– 1q pentaeritritol tetranitratın partlayası zamanı ayrılan enerjinin qiyməti təyin edilmiş və bunun təqribən 9 q barıt və ya 1,24 q trotilin partlayışı zamanı ayrılan enerjiyə ekvivalent olduğu müəyyən edilmişdir.

– Müasir müharibələrdə hədəf olaraq nəinki hərbi texnika və obyektlər, həmçinin insanların gündəlik işlətdiyi məişət texnikaları da ola bilər. Bu yeni müharibə üsulu və kiber müharibənin başlanğıcı hesab oluna bilər.

**Açar sözlər:** peyçer, barıt, trotil, pentaerythritol tetranitrate, kiberhücum, kibermüharibə.

**Giriş.** Həmas təşkilatının 7 oktyabr 2023-cü ildə İsrailə hücumuna başlamasından bir gün sonra Həmasa dəstək olaraq Hizbullah Livandan İsraili atəşə tutaraq münəfişəyə qoşuldu. Bu, Hizbullah və İsrail arasında İsrail-Livan sərhədində münəfişənin başlanmasına səbəb oldu. Həmin vaxtdan Hizbullah təşkilatının üzvləri mobil telefonlar vasitəsilə onların izlənilə biləcəyindən ehtiyat üçün mobil telefonların əvəzinə naqilsiz peyçerlərdən istifadə etmək qərarına gəldilər.

Hadisədən iki il əvvəl bir şirkət Hizbullah nümayəndələrinə bir qədər böyük və ağır, lakin daha güclü və sahə şəraitinə daha yaxşı uyğunlaşan, həmçinin şəbəkədən kabel vasitəsilə əlaqələndirilmiş peyçerləri təklif etmişdir. Şirkət əvvəllər Tayvanın Apollo şirkətinin yaxın şərqdəki nümayəndəsi olmuş, sonra isə öz şirkətini açaraq Apollo brendi altında qurğuları satmaq üçün lisenziya almış qadın (adı və milliyyəti açıqlanmır) idarə edirdi. Hizbullahın rəhbərliyi bu təkliflə razılaşaraq onlardan 5000 peyçer (Şəkil 1) almışdı. Peyçerlərdə partlayıcı maddə yerləşdirilmiş və həmçinin adi batareyalardan bir qədər böyük batareyalar ilə təmin edilərək İsrail kəşfiyyat xidmətinə bütün istifadə olunan telekommunikasiya qurğularına çıxış imkanı verən ötürücü ilə təchiz edilmişdir. Güman edilir ki, İsrail siyasi rəhbərliyi Hizbullahın telekommunikasiya qurğularında yerləşdirilən partlayıcı maddə barədə yalnız 2024-cü il sentyabrın 12-də yüksək rütbəli hərbiçilərlə görüş zamanı məlum olmuşdur. Hadisənin səbəblərindən biri olaraq artıq Hizbullah tərəfindən partlayıcı qurğuların aşkarlanması riski son dərəcə reallaşmışdı. Buna görə də diqqətlə düşünülmüş və hazırlanmış əməliyyat uğursuzluqla nəticələnə bilərdi. İclas iştirakçıları arasında cihazların işə salınması ilə bağlı yekdil fikir olmadığı və çoxları təxribatın zorakılığın yeni eskalasiyasına səbəb olacağından ehtiyat edirdi. Beləliklə 2024-cü il sentyabrın 17 və 18-də Livan və Suriyada Hizbullah təşkilatının rabitə cihazlarında güclü partlayışlar baş verdi (Şəkil 2).

Partlayışların ilk dalğası nəticəsində, 9-u Livanda, 7-si Suriyada olmaqla azı 16 nəfər həlak olmuşdur. Müxtəlif mənbələrə görə, ən azı 3000-dən və ya 4000-dən çox insan yaralanmış, 500-dən çox insan isə görmə qabiliyyətini itirmişdir. Partlayışlar Livanın cənubundakı Beyrut ətrafındakı Dahiya və Bekaa vadisi də daxil olmaqla Hizbullahın bir neçə mühüm obyektlərinə təsir etmişdir.

Partlayışların ikinci dalğası 18 sentyabr 2024-cü tarixində baş vermiş və bu zaman radioelektron avadanlıqların partlaması nəticəsində azı 25 nəfər həlak olmuş, 700-dən çox insan yaralanmışdır. Günəş panelləri də daxil olmaqla, digər elektron cihazlarının partlaması da qeydə alınmışdır [1]. Ən çox partlayışa məruz qalan qurğu peyçer qurğuları və ehtimal olunan partlayıcı maddə “pentaerythritol tetranitrate”dir [2-6]. Əməliyyatın ən müasir vasitələrlə aparılması və digər ölkələrdə də buna oxşar risklərin ola biləcəyini nəzərə alaraq məsələnin tədqiq olunması olduqca aktualdır.



**Şəkil 1.** Peyçer cihazı



*Şəkil 2. Partlamış peycerin qalıqları*

**Peycer cihazları.** Peycer cihazları təhlükəsizlik və təcili vəziyyətlərdə istifadə olunan mətin, səsli mesajları qəbul edən, göstərən və xarakterik səs yayan naqilsiz rabitə vasitəsi və ya cihazıdır (Şəkil 1). Məlumatlar radio siqnallar vasitəsilə peyçinq şəbəkəsi daxilində ötürülür. Mesajların həcmi bir neçə yüz simvola və bir neçə saniyə ötürülmə müddətinə çata bilər. Bəzi peyçerlər istənilən vaxt mesaj yazmağa və onlara baxmaq imkanı verir. Cihaz birtərəfli (simpleks) və ya ikitərəfli (dupleks) əlaqəni dəstəkləyə bilər. Peyçerdə iki elektron lövhə var. Sol tərəf təsviri emal edir və göstərir, sağ tərəf isə antenadan siqnal alır. Həmçinin onun zəng və vibrasiya mühərriki var [7,8]. Peyçerlərin növlərini aşağıdakı kimi qruplaşdırmaq olar: Yalnız bildiriş üçün; Rəqəmli; Simvol. Mətinləri daxil etmək üçün kiçik daxili klaviatura da ola bilər.

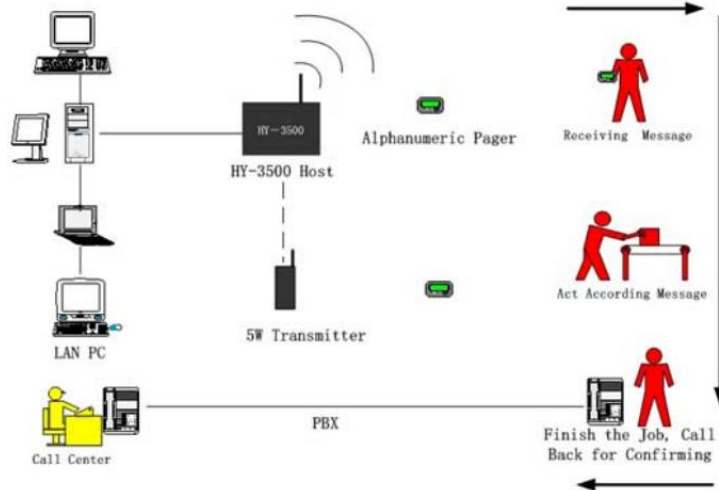
Peycer ilk dəfə ABŞ-da 1921-ci ildə Şerman Amegana tərəfindən ixtira olunub və Detroit polisi tərəfindən istifadə edilmişdir. Polis patrul avtomobillərində birtərəfli radio ötürücü cihaz kimi istifadə edilmişdir. Mühəndis Al Qross 1949-cu ildə ilk peyçerin patentini aldı. 1950-ci ildə onun aparatları Nyu York yəhudi xəstəxanasında istifadə olunmuşdur. Peyçerlər şəbəkə daxilində işləyir. İxtiyarı abunəçi ilə əlaqə saxlamaq üçün onun nömrəsini qeyd edir və mesaj diktə edilir. Sonra xüsusi bir ötürücü fərdi qəbuledici qurğuya siqnal ötürən baza stansiyası işə salınır. Qəbul edən peyçer həmişə dinləmə rejimində olur və ona təyin edilmiş unikal nömrə göstərildiyi təqdirdə mesaj cavab verir. Şəbəkə ötürücüləri müəyyən bir tezlikdə siqnalları ötürür, onlar müəyyən tezlik diapazonu daxilində peyçerlər tərəfindən dinlənir.

Yüksək tezlikli 138 MHz - 466 MHz radiosiqnallarından istifadə edir və siqnalları daha uzaq məsafələrə yaymaq üçün antenalar istifadə olunur (Şəkil 3). Peyçerlərin bir neçə mühüm üstünlükləri var. Ünsiyyət üçün etibarlı əlaqə vasitəsidir; şəbəkənin təhlükəsizliyi və göndərənin məxfiliyi qorunur; istifadə rahatlığı; yüngül, kiçik, yığcam və çox vaxt müddəti üçün işlədilən batareyaya malikdir. Peyçerlər adətən sadə və təhlükəsiz cihazlar hesab olunur, çünki onlar yalnız radio siqnalları qəbul etmək üçün nəzərdə tutulub və zəif batareya ilə işləyir. Lakin texnoloji cəhətdən “kənardan müdaxilə” mümkün olsa da, bunun üçün yüksək səviyyəli texniki bacarıq və kibertəhlükəsizlik nöqsanları səbəbindən onlara müdaxilə oluna və onların proqram təminatı manipulyasiya edilə bilər və ya güclü radiosiqnallar vasitəsilə kibershücumlar baş verə bilər. Bəzi hallarda belə cihazların elektron hissələri kənar müdaxilələr nəticəsində sıradan çıxır və təhlükəli hala gələ bilər. Elektron cihazlara xüsusən elektromaqnit siqnalların təsiri mümkünlüyü səbəbindən belə hallar baş verə bilər.

Peyçerlərin partlaması texnoloji baxımdan mürəkkəb prosesdir, çünki bu cihazlar adətən təhlükəsiz, aşağı güc ilə işləyən sistemlərdir. Ancaq belə partlayışlar əsasən cihazın batareyası və ya elektron komponentlərində olan qüsurlar, kənardan müdaxilə və ya kibertəhlükəsizlik boşluqları nəticəsində partlayışlar baş verə bilər: batareya problemi; kənardan müdaxilə; elektromaqnit dalğaları.

**Peycer partlayışının qarşısını necə almaq olar? Batareyanın təhlükəsizliyi.** Yüksək keyfiyyətli və sertifikatlaşdırılmış batareyalardan istifadə etmək lazımdır. Batareyaların həddindən artıq yüklənməməsi və düzgün şəraitdə saxlanması partlayış riskini azaldır. Peyçerlərin proqram təminatının və şəbəkə təhlükəsizliyinin gücləndirilməsi vacibdir. Zərərli siqnallara qarşı mühafizə

mexanizmləri quraşdırılmalı və cihazlara kənardan müdaxilə mümkün olmamalıdır. Cihazın daxili temperaturu və batareya yüklənməsi nəzarət altında saxlanmalıdır. Qızmaya səbəb olacaq vəziyyətlərin qarşısını almaq üçün əlavə sensorlar və qoruyucu mexanizmlər istifadə olunması lazımdır.



Şəkil 3. Peycerlərin lokal şəbəkəsi

**Partlayış törədilən peycer cihazları.** Hazırda ən çox partlayış törədilən peycerlərinin təxminən 3 - 10 q partlayıcı maddə yerləşdirildiyi və partlayışların eyni vaxtda baş verdiyi müəyyən olunmuşdur. Ancaq kim tərəfindən və harada partlayıcı maddə yerləşdirildiyi hələ məlum deyildir. Partlayışların törədilməsi ilə əlaqədar keçmiş İsrail kəşfiyyatçılarının CBS News-a müsahibələrdə özlərini Maykl və Qabriel kimi təqdim edən agentlərə görə İsrailin kəşfiyyat xidməti Hizbullahın aldığı peycerlərə əvvəlcədən partlayıcı maddəni yerləşdirərək əməliyyatı həyata keçirmişdir (şəkil 4) [9].

Hizbullahı peycer cihazları ilə İsrailin özü təmin edib. Belə ki, satıcı şirkətlər İsrail kəşfiyyat xidməti tərəfindən yaradılıb və bu şirkətlər vasitəsilə peycerlərin çatdırılmasını təmin etmişdir. Cihazlara partlayıcı maddə limanda yerləşdirilmişdir. Ona görə ki, Livan sanksiyalarla üzləşdiyi üçün ölkəyə gətirilən mallar bir çox hallarda limanda icazə üçün gözləyir. Bu məhsulların 3 ay ərzində limanda gözlədiyini nəzərə alsaq, Hizbullahın sifariş verdiyi məhsullar limanda saxlanılarkən, batareyanın yanında partlayıcı çiplər yerləşdirildiyi və uzaqdan iş salmaq üçün açarla təchiz edildiyi müəyyən olunmuşdur. Mesajı aldıqdan sonra qurğularda eyni vaxtda işə partlayış baş vermişdir.

Livan təhlükəsizlik xidməti işçilərinin məlumatına əsasən İsrail kəşfiyyat xidməti bir neçə ay əvvəl Hizbullahın sifarişi ilə Tayvan istehsalı olan 5000 peyceri Livana 2024-cü ilin yazında gətirib. Qurğular İsrailin kəşfiyyatı tərəfindən "istehsal mərhələsində" modifikasiya edilmişdir. Partlayışlar zamanı bir xarakterik detal məlum olmuşdur. Partlayışdan əvvəl cihaz təxminən 10 saniyə ərzində kəskin signal veriməsi və istifadəçini nə baş verdiyini görmək üçün onu üzünə tutmağa sövq etməsidir. Peycerlərə azı 3 - 10 q miqdarında partlayıcı maddənin yerləşdirildiyi güman edilir. Partlayıcıyı batareyanın üzərinə xüsusi partlayıcı maddə olan lövhələr qoyulub, ya da batareyaların özü bu maddə ilə doldurulub.



**Şəkil 4.** Solda adi, sağda isə partlayıcı maddə qoyulmuş peycer cihazı

Litium ion batareyaları parlayış üçün vacibdir. Həmçinin işıq signalını təmin etmək üçün daxili LED-in olası və onun yerinə detonator quraşdırıla bilər. Mikropartlayışa başlamaq üçün detonatora gərginlik tətbiq etməklə  $215^{\circ}\text{C}$ -yə qədər qızdırmaqla alovlanmaya səbəb olar. Yəni litium batareyanın partlayıcı maddə ilə əhatə olunmuş qoruyucu kapsul daxil edilir. Bu qoruyucu qapağı cihazın kortəbii partlamasının qarşısını almaq üçün katod və anod arasındakı qarşılıqlı əlaqəni bloklayır. Qoruyucu kapsulun üstündə enerji təchizatı sistemi və müvafiq olaraq signal qəbuletmə sistemi var. Elektrik enerjisi batareyanın özündən götürülə bilər. Peycerin radio modulu və ya GSM modulu var ki, bunun vasitəsi ilə ömrü verilə bilər. GSM modulu, zəng qəbul edərkən enerji təchizatı sistemindən birbaşa qoruyucuya signal ötürür. Bu sxem peycerin funksiyalarından istifadə etmədən də işləyə bilər. Mesajı aldıqdan sonra şifrələnmiş məlumatlara baxmaq üçün eyni anda iki düyməni sıxmaq lazım olan təlimatlara əməl edilmişdir. Bu dekodlaşdırma prosesi partlayışlar zamanı istifadəçilərin əksəriyyətinin peyceri iki əllə tutmasını təmin etmişdir. Göstərişlərə əməl edilmədiyi hallarda isə peycerlərin bir neçə saniyədən sonra partlaması da müşahidə olunmuşdur.

Peycer enerjiyə qənaət etmək üçün çox vaxt yuxu rejimində olur. Belə ki, əgər daxil olan kod yaddaşda əvvəlcədən yerləşdirilmiş kodların siyahısına uyğun gəlmirsə, cihaz yuxu rejimində qalır. Əgər kod uyğun gəlirsə, peycer mesajın qalan hissəsini deşifrə edir və onu ekranda göstərir. Peycerə mesaj göndərmək üçün antena və ötürücü lazımdır. Bəzi peycer şirkətləri e-poçt və ya internet vasitəsilə birbaşa fərdi kompüterdən mesaj göndərmək imkanı verir. Beləliklə, peycerlər əvvəlcədən eyni kodlaşdırıla bilər. İki düymənin eyni vaxtda sıxılması zərurətinə gəlincə, peycerlər Hizbullaha mesajların şifrəsini açmaq üçün xüsusi tədbirlər tələb edən “xüsusi qorunan” cihazlar kimi satılıb. Belə işləyə bilən peycerlərin istehsalçıların cihazlarında yoxdur və onların Gold Apollo peycerləri ilə uyğun olub-olmadığı hələ də bəlli deyil. Deşifrə prosesini (kriptografik əməliyyat) peycer tərəfindən həyata keçirmək üçün adi peycerdən daha çox hesablama tələb olunur. Yəqin ki, belə bir proses ayrıca çipdə aparılmışdır [10-12].

**Ehtimal olunan partlayıcı maddənin nəzəri araşdırılması.** Partlayıcı olaraq penta eritritol tetra nitrat (penta erythritol tetra nitrate, PETN) ( $\text{CH}_2\text{ONO}_2$ )<sub>4</sub>C kimyəvi tərkibli maddə istifadə olunmuşdur (Şəkil 5). Bu maddə güclü yüksək partlayıcı, həssas, təmiz formada detonator qapaqlarının, fleqmatlaşdırılmış formada isə kumulyativ ehtiyatların və partlayıcı naqilinin təchiz edilməsi üçün istifadə olunur [13-15].

Kimyəvi davamlı və ağ kristal tozdur [16]. İlk dəfə 1894-cü ildə Almaniyada istehsal edilmişdir. Suda həll olunmayan, su ilə, eləcə də zəif turşular və qələvilərlə uzun müddət qaynadıldıqda parçalanır və dinitropentaeritritol əmələ gətirir. Qələvi mühitdə tetranitrometana səmərəliliyinə bərabər olan yumşaq nitratlaşdırıcı agent kimi istifadə edilə bilər. Çətinliklə alovlanır, az miqdarda xışıltı ilə sakitcə yanır. Qaz ocağının alovunda şiddətlə partlayır. Onun bəzi parametrləri aşağıdakı kimidir [17-19]:



- sıxlığı  $1,773 \text{ q/sm}^3$ ;
- parçalanma ilə ərimə temperaturu  $141^\circ\text{C}$ ; alışma temperaturu təxminən  $205^\circ\text{C}$ ;
- zərbəyə həssaslığı:  $2 \text{ kq}$  yük və  $10\text{-}17 \text{ sm}$  düşmə hündürlüyündə partlayır;
- detonasiyaya həssaslığı:  $0,17 \text{ q}$  partlayıcı civə üçün,  $0,05 \text{ q}$  TA üçün və qurğuşun azid üçün  $0,03 \text{ q}$ ;
- detonatorda həтта (rütubət)  $40\%$  su olduqda da partlayır;
- güclü partlayıcı, partlayışın enerjisi:  $5810 \text{ kC/kq}$  ( $1390 \text{ kkal/kq}$ ), buna görə də  $1 \text{ kq}$  PETN  $1,24 \text{ kq}$  TNT enerjisinə malikdir;
- partlayış temperaturu:  $4200 \text{ K}$  (təxminən  $3926^\circ\text{C}$ ); partlayış sürəti:  $8350\text{-}8590 \text{ m/s}$ ;
- kritik diametri:  $1\text{-}1,5 \text{ mm}$ .

Qızdırıldıqda, güclü özünü sürətləndirmə ilə, tez-tez partlayışla parçalanır. Elektrik qılgıcılığına qarşı həssas olub və elektriklişə bilər.

Penta eritritol tetra nitratın nəzəri öyrənilməsində qeyriempirik kvantmexaniki metod istifadə olunmuşdur [20]. Bu metodda aşağıdakı qeyri-xətti cəbri tənliklər sistemindən istifadə olunur:

$$\sum_{q=1}^m (F_{i,pq} - \varepsilon_i S_{pq}) c_{qi} = 0, \quad (p = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

burada

$$F_{i,pq} = f_i H_{pq} + \sum_{jkl} \sum_{rs} c_{rk}^* c_{sl} (2A_{ij,kl} J_{pr,qs} - B_{ij,kl} J_{pr,sq}) \quad (2)$$

$$S_{pq} = \int \chi_p \chi_q dV \quad (3)$$

işarə edilmişdir.  $\varepsilon_i$  -  $i$ -ci elektronun orbital enerjisi,  $f_i$  -  $i$ -ci təbəqənin elektronlarla məskunluğu dərəcəsi,  $c_{qi}$  - naməlum əmsallar,  $\chi_p$  - bazis funksiyalar,  $S_{pq}$  - örtmə matrisi,  $H_{pq}$  - Hamilton operatorunun birelektronlu matris elementləri,  $J_{pr,qs}$ ,  $J_{pr,sq}$  - ikielektronlu matris elementləri,  $A_{ij,kl}$  və  $B_{ij,kl}$  - dörd ölçülü matris elementləridir [20].

Partlayıcı maddənin tam elektron enerjisini hesablamaq üçün

$$E = 2 \sum_{ipq} c_{pi}^* c_{qi} f_i H_{pq} + \sum_{ijk\ell} \sum_{prqs} c_{pi}^* c_{rk}^* c_{qj} c_{sl} (2A_{ij,kl} J_{pr,qs} - B_{ij,kl} J_{pr,sq}) \quad (4)$$

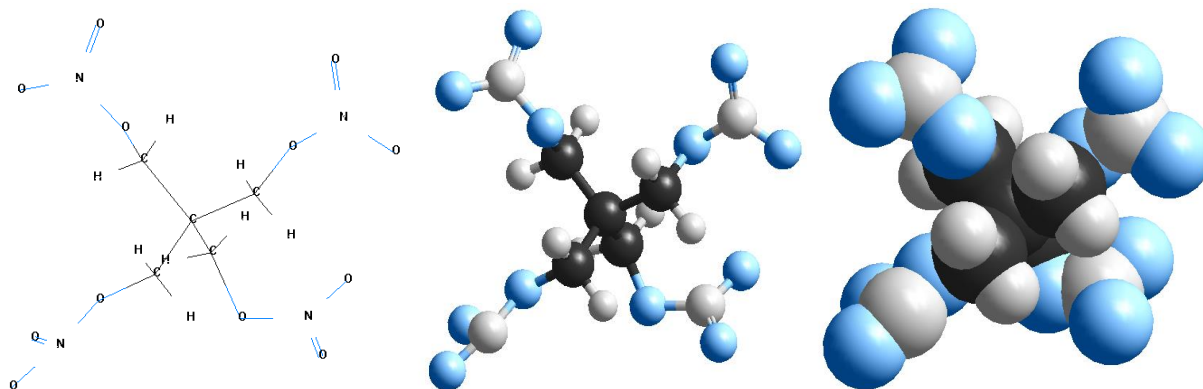
düsturundan istifadə olunur.  $c_{qi}$  naməlum əmsallarını tapmaq üçün (1) tənliklər sistemini həll etmək lazımdır. Nəticədə  $\varepsilon_i$ -orbital enerjilərinin və  $c_{qi}$  - əmsallarının qiymətləri tapılır. Bu qiymətlər vasitəsilə  $(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4\text{C}$  partlayıcı maddənin tam  $E_{\text{PETN}} = -1291,587304$  (a.v.) və ona daxil olan oksigen  $E_O = -73.661813$  (a.v.), carbon  $E_C = -37.089584$  (a.v.), azot  $E_N = -53.554533$  (a.v.), hidrogen  $E_H = -0.466582$  (a.v.) atomların, elektronlar tərəfindən tutulmuş ən yuxarı səviyyənin  $\varepsilon_{\text{HOMO}} = -5,800512 \text{ eV}$  və elektronlar olmayan aşağı boş  $\varepsilon_{\text{LUMO}} = 4,925366 \text{ eV}$  molekulyar orbitalların, sabillik  $\Delta E = E_{\text{EPETN}} - (8E_H + 5E_C + 4E_N + 12E_O) = -4.246840$  (a.v.) enerjilərinin (Cədvəl 1) və vizual modelə əsasən kimyəvi quruluşa daxil olan atomların  $r = 0,143857 \text{ nm}$  atomlar arası rabitə uzunluğunun qiymətləri tapılmışdır [21].

**Partlayıcı maddənin partlayışı zamanı ayrılan enerjinin hesablanması.** Stabiləşmə (rabitə)  $E_b = |\Delta E| = 4.246840 \text{ a.v.} = 1.851528 \cdot 10^{-17} \text{ C}$  enerjisinin qiymətinə (Cədvəl 1), penta eritritol tetra nitratın vizual modelinə əsasən partlayıcı maddənin molyar kütləsinə  $M_{\text{petn}} = 316.135 \cdot 10^{-3} \text{ kq/mol}$  və  $M_{\text{pk}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kq}$  miqdarda partlayıcının partlaması zamanı ayrılan enerjini hesablayaq üçün əvvəlcə  $1 \cdot 10^{-3} \text{ kq}$  partlayıcıda olan molekulların sayını hesablayaq  $MS = \frac{M_{\text{pk}}}{M_{\text{petn}}} \cdot Na = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{316.135 \cdot 10^{-3}} \cdot 6.0221415 \cdot 10^{23} = 1.905 \cdot 10^{21}$ , burada  $Na = 6.022142/\text{mol}$  Avaqodra ədədidir. Onda bir molekulunun partlayışı zamanı ayrılan enerjisini 1 qram penta eritritol tetra nitratdakı molekulların sayına vursaq onda ayrılan enerjini hesablaya bilərik:  $E_a = 1.851528 \cdot 10^{-17} \cdot MS = 35270.27 \text{ C}$ . Beləliklə, ən azı  $3 \text{ q}$  və ya ən çoxu  $10 \text{ q}$  partlayıcı istifadə olunarsa, onda ayrılan enerji uyğun olaraq  $105811 \text{ C}$  və  $352703 \text{ C}$  olar.

Partlayıcı maddənin 1  $q$  partlayışının barıt partlayıcı maddə ilə ekvivalentini hesablamaq üçün 1 $q$  penta eritritol tetra nitratin partlayışı zamanı ayrılan enerjisinin, barıtın partlayışı zamanı ayrılan xüsusi enerjisinin  $qB = 3800 \text{ C/kq}$  qiymətlərindən və  $mB = \frac{Ea}{qB}$  düsturundan istifadə edək. Onda  $mB = \frac{Ea}{qB} = \frac{35270.27}{3800} = 9.28 \approx 9 \text{ q}$ . Yəni bu o deməkdir ki, 1 $q$  penta eritritol tetra nitratin partlayışı zamanı ayrılan enerji təqribi olaraq 9  $q$  barıtın partlayışı zamanı ayrılan enerjiyə ekvivalentdir. 1 $q$  penta eritritol tetra nitratin partlayışı zamanı ayrılan enerji təqribibən 1,24  $q$  trotilin partlayışı zamanı ayrılan enerjiyə ekvivalentdir [16-19].

Cədvəl 1.  
Penta eritritol tetra nitratin energetik parametrlərinin hesablanmış qiymətləri

| Sıra №-si | $\varepsilon_{HOMO}$ (eV) | $\varepsilon_{LUMO}$ (eV) | Tam enerji $E$ (a.v.) | Stabillik parametri $\Delta E$ ( a.v.) | İonlaşma potensialı $I_p$ (eV) | Qadağan olunmuş zonanın qiyməti $E_g$ (eV) | Süalandıra biləcəyi fotonun dalğa uzunluğu $\lambda$ (nm) |
|-----------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1         | -5,800512                 | 4,925366                  | -1291,587304          | -4,246840                              | 5,800512                       | 10,725878                                  | 116                                                       |



**Şəkil 5.**  $(CH_2ONO_2)_4C$  partlayıcı maddənin kimyəvi quruluşu

**Partlayıcı maddənin mexaniki parametrlərinin hesablanması.** Stabilləşmə (rabitə) və ya bir molekulunun partlaması zamanı ayrılan enerjinin qiymətinə (Cədvəl 1) görə partlayıcı maddənin mexaniki parametrlərinin -  $k$  sərtlik əmsalının,  $Y$  Yunq,  $\sigma$  deformasiya,  $G$  sürüşmə,  $K$  həcmi elastiki və  $HN$  möhkəmlilik modullarının qiymətlərini hesablamaq olar. Bunun üçün rabitə enerjisini  $E_b = 1.851528 \cdot 10^{-17} \text{ C}$ , atomlar arasındakı rabitə uzunluğunun  $r = 0,143857 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ , en kəsiyinin sahəsi  $S = 6.251271 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  və ölçüsü  $D = 0,9695 \cdot 10^{-9} \text{ m}$  istifadə edək. Əvvəlcə PETN-ni parçalamaq üçün qüvvənin qiymət hesablayıb digər mexaniki kəmiyyətləri də hesablamaq olar [22-24]:

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{E_b}{r} = 7.565487 \cdot 10^{-8} \text{ N}, & Y &= \frac{F}{S} = 206 \cdot 10^9 \text{ Pa}, & k &= Y \cdot \frac{S}{D} = 133 \text{ N/m}, \\
 \sigma &= Y \cdot \frac{r}{D} = 31 \cdot 10^9 \text{ Pa}, & G &= \frac{Y}{2 \cdot (1+\nu)} = 77 \cdot 10^9 \text{ Pa}, \\
 K &= \frac{Y}{3 \cdot (1-2 \cdot \nu)} = 213 \cdot 10^9 \text{ Pa}, & HN &= G \cdot A \cdot e^{-B \cdot T} = 3.2 \cdot 10^9 \text{ Pa}.
 \end{aligned}$$

**Nəticə.** Telekommunikasiya qurğularında baş verən partlayışlar və ya onların zərər görməsi müxtəlif səbəblərdən ola bilər. Bu kimi partlayışlar əsasən iki üsulla həyata keçirilə bilər:

1. Fiziki müdaxilə: cihazların olduğu yerlərə fiziki girişi təmin edərək partlayıcı qurğular yerləşdirilə bilər.

2. Elektron hücumlar və ya kiber müdaxilələr: telekommunikasiya cihazlarına zərərli proqram yüklənə bilər və bu proqram cihazların işini poza və ya partlamasına səbəb ola bilər.

Partlayışa məruz qalan əsas cihaz AR-924 peyçerinə oxşar olan qurğulardır. Peyçerlərin partlayışa məruz qalması, fiziki müdaxilə nəticəsində baş vermişdir. Bu növ peyçerlərdə kiçik miqdarda partlayıcı maddə yerləşdirilməsi mümkündür. Partlayıcı maddə olaraq PETN kimi kiçik ölçülü, amma yüksək partlayıcı gücə malik maddələr istifadə edilmişdir. Telekommunikasiya qurğularında kütləvi partlayışların baş verməsi səbəblərinin tədqiq edilərək aşağıdakı nəticələr alınmışdır:

Penta eritritol tetra nitrat ( $CH_2ONO_2$ )<sub>4</sub>C partlayıcı maddənin kvant mexaniki hesablamalar aparılaraq onun energetik parametrlərinin qiymətləri tapılmış, mexaniki xassələri müəyyən edilmiş və partlayıcı maddənin 1q partlayışı zamanı ayrılan enerjinin qiyməti təyin edilmişdir. Bunun təqribən 9 q barıt və ya 1,24 q trotilin partlaması zamanı ayrılan enerjiyə ekvivalent olduğu müəyyən edilmişdir.

Ümumi nəticə olaraq bu qənaətə gəlmək olar ki, Hizbullahın istifadə etdiyi peyçerlər və digər telekommunikasiya qurğularındakı partlayışlar əvvəlcədən planlaşdırılmış əməliyyatların bir hissəsi ola bilər.

### Ədəbiyyat

1. Хакеры могли взорвать пейджеры членов «Хезболлы», перегрев батареи. (2024). <https://www.gazeta.ru/tech/news/2024/09/17/23945935.shtml>.
2. СМИ: "Моссад" заложил взрывчатку в пейджеры для "Хезболлах". (2024). <https://www.dw.com/ru/smi-mossad-zalozil-vzryvcatku-v-pejdzery-dla-hezbollah/a-70244736>
3. Москва назвала терроризмом взрыв пейджеров «Хезболлы». (2024). <https://www.rbc.ru/politics/18/09/2024/66ea96809a79475d4434bfff>,
4. Взрыв из прошлого: как вера в надежность пейджеров подвела движение «Хезболла». (2024). <https://www.forbes.ru/mneniya/521431-vzryv-iz-proslogo-kak-vera-v-nadeznost-pejdzherov-podvela-dvizenie-hezbollah>.
5. Пейджеры в Ливане перед взрывом звонили, сообщили СМИ. (2024). <https://ria.ru/20240918/pejdzheriy-1973325148.html>,
6. Израиль заложил взрывчатку в тайваньские пейджеры "Хезболлы". (2024). <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2024/09/18/7475603/>,
7. Взрывы устройств «Хезболлы»: вопросы, по-прежнему требующие ответов. (2024). <https://www.bbc.com/russian/articles/c4g49ll40ego>.
8. Членам «Хезболлы» раздали пейджеры за пару часов до детонации. (2024). <https://runews24.ru/politics/21/09/2024/xzbollah-razdavala-pejdzheriyi-so-vzryivchatkoj-zachasyi-do-vzryiva>,
9. Юлия Трепалина. Бывшие агенты «Моссада» раскрыли детали операции с подрывом пейджеров в Ливане. (2024). <https://naked-science.ru/article/tech/mossad-podryv-pejdzherov>.
10. В США раскрыли, какие сообщения отправили на пейджеры перед взрывами в Ливане. (07 октябрь 2024). <https://www.google.com/search?q=gazeta.ru>.
11. Взрывчатка в аккумуляторах и зашифрованное сообщение: как подорвали пейджеры «Хезболлы». (2024). <https://www.gazeta.ru/tech/2024/10/07/19861711.shtml>.

12. Вопросов все больше: что известно о технологии подрыва пейджеров в Ливане. (14 октябрь 2024). <https://ren.tv/news/v-mire/1262383-voprosov-vse-bolshe-chto-izvestno-o-tekhnologii-podryva-peidzherov-v-livane>.
13. Rəsulov, S.R., Şahpələngova, B.Ş. (2018). Yanma və partlayış nəzəriyyəsil. Dərslik, Bakı, ADNSU-nun nəşri, 268 s.
14. Paul W. Cooper, Stanley R. Kurowski. (1997). Introduction to the Technology of Explosives, 224 p.
15. Wildon Fickett, William C. Davis. (2012). Detonation: Theory and experiment front cover. Courier Corporation, 400 p.
16. Pentaerythritol tetranitrate. (2024). [https://en.wikipedia.org/wiki/Pentaerythritol\\_tetranitrate#Further\\_reading](https://en.wikipedia.org/wiki/Pentaerythritol_tetranitrate#Further_reading).
17. Hezbollah. (2024). <https://en.wikipedia.org/wiki/Hezbollah>.
18. Тринитротолуол. (2024). <https://ru.wikipedia.org/wiki/Тринитротолуол>.
19. Lebanon pager explosions. (2024). [https://en.wikipedia.org/wiki/2024\\_Lebanon\\_pager\\_explosions](https://en.wikipedia.org/wiki/2024_Lebanon_pager_explosions),
20. Минкин, В.И. (2010). Теория строения молекул / В.И.Минкин, Б.Я.Симкин, Р.М. Миняев, – Ростов на Дону: Феникс, – 560 с.
21. HyperChem release 7. (2002). / – USA: Hypercube, Inc., –2170 p.
22. Mathcad. (2025). Wikipedia the free an encyclopedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mathcad>.
23. Bayramov, A. A., & Gasanov, A. G. (2021). Mechanical Properties of Materials Based on Graphene C 62 H 20 and Polyethylene (-CH 2-CH 2-)n. *Journal of Technical Physics*, 66(3), 416-421.
24. Gasanov, A. G., & Bayramov, A. A. (2019). Simulation of the Electronic Structure of Graphene–Polyvinylidene Fluoride Composite Material. *Physics of the Solid State*, 61(1), 56-61.

## MASSIVE EXPLOSIONS AT HIZBALLAH TELECOMMUNICATION FACILITIES – THE BEGINNING OF A NEW METHOD OF WAR AND CYBERWAR

Akhundov R.G., Islamov I.J., Gasanov A.G., Abdullayeva A.J.

**Abstract.** As a result of massive explosions at Hezbollah telecommunications facilities in Lebanon and Syria on 09/17/2024 and 09/18/2024, more than 41 people were killed, 5,000 people were injured, and more than 500 people were blinded. Explosions of other electronic devices, including solar panels, were also reported. This paper examined the causes of the massive explosions. It was found that pentaerythritol tetranitrate was the probable explosive in the exploded pagers. Taking into account the possibility of risky situations, the problem was analyzed theoretically and interesting results were obtained:

- the values of the energy parameters of the explosive with the chemical structure of pentaerythritol tetranitrate ( $(CH_2ONO_2)_4C$ ) were determined by performing calculations using the nonempirical quantum mechanical method;
- the mechanical properties of pentaerythritol tetranitrate explosive with the chemical structure ( $(CH_2ONO_2)_4C$ ) were determined;

- the energy released during the explosion of 1 g of pentaerythritol tetranitrate was determined and turned out to be approximately equivalent to the energy released during the explosion of 9 g of gunpowder or 1.24 g of TNT.

- In modern wars, targets can be not only military equipment and objects, but also household appliances used by people in everyday life. This can be considered a new way of waging war and the beginning of cyber warfare.

**Keywords:** pager, gunpowder, TNT, pentaerythritol tetranitrate, cyber attack, cyber warfare.



## EMOTIONALLY AWARE AI SIMULATORS: A CASE STUDY OF THE WASABI ARCHITECTURE



**Mustafayeva E.E.**

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan  
elvinamustafayeva13@gmail.com

**Abstract.** The paper explores how emotional AI enhances human-computer interaction. Traditional systems lack realistic emotional modeling, limiting user engagement. WASABI, developed by Christian Becker-Asano, integrates emotion processes into virtual agents using psychology and cognitive science. It uses the PAD space to simulate emotions like happiness and anxiety. The MAX agent, tested as a guide and in games, showed increased credibility and engagement, confirmed by physiological responses. The study highlights WASABI's potential in education and interaction, while also raising ethical concerns around emotional data and the need for advanced emotional modeling.

**Keywords:** emotionally aware AI, virtual agents, WASABI architecture, PAD model, human-computer interaction (HCI), affective computing, MAX (Multimodal Assembly eXpert)

**Introduction.** An increasing number of individuals have recognized that the development of AI capable of comprehending emotions is essential for enhancing human-computer interaction (HCI). Traditional AI, which predominantly relies on logical reasoning, has struggled to replicate the complexity and authenticity of human emotional behavior. This has limited its usefulness in use in educational and interactive contexts. Christian Becker-Asano's WASABI architecture addresses this issue by incorporating emotional processes into virtual agents. The Multimodal Assembly eXpert (MAX) serves as a realistic platform for testing these innovative ideas.

This approach is most clearly illustrated by the perceive–reason–act cognitive architecture underlying MAX (see Figure 1). Drawing on this scheme, the agent processes sensory information through multi-channel perception modules, then employs both reactive and deliberative reasoning—closely coupled with simulated emotional states—to generate credible actions and responses. For instance, as shown in the referenced diagram, emotional dynamics mediate between low-level sensory input and high-level planning, resulting in more natural and contextually appropriate reactions.

In the context of natural and effective human–computer interaction, credible emotion is essential. This is particularly relevant in educational and simulation environments, where engagement and empathy can enhance student learning. If virtual entities fail to convey emotion effectively, they may be perceived as inauthentic and uninteresting. WASABI integrates psychology, neurology, and cognitive science to develop models that capture the complexity of human emotions and their impact on behavior. This makes it especially valuable for AI simulators used in education.

Previous affective computing architectures—such as H-CogAff, FLAME, EMA, and Soar-Emote—have contributed valuable insights into computational emotion modeling but frequently lack complex emotional dynamics or real-time involvement. Many individuals utilize pre-scripted or simplistic models, which make them less credible and effective in educational contexts. WASABI aims to establish a new standard for emotionally intelligent AI by addressing these issues. This will enhance both the technology and our understanding of effective engagement with agents [1].

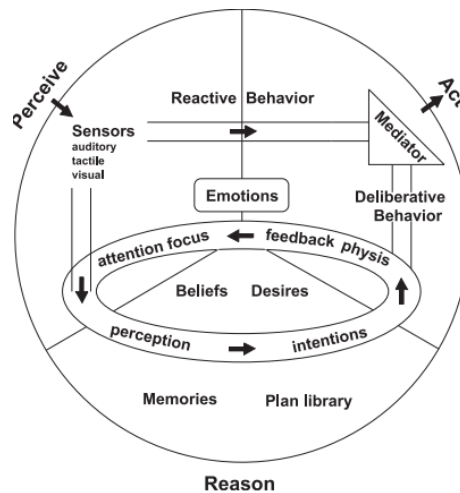


**Fig.1.** MAX's overall cognitive architecture as the perceive-reason-act triade[1].

**Methods, Tools, and Techniques.** The methodological foundation of the WASABI architecture is based on a precise understanding of how to simulate emotions. The method starts by clearly defining and separating affective phenomena: emotions, moods, and personality. Emotions are characterized as short-term, strong reactions to certain occurrences, whereas moods are longer-lasting, weaker, and not always linked to a particular stimulus. Personality, on the other hand, is seen as a consistent trait that influences both emotional and mood responses.

The modeling of emotion dynamics and the interaction between cognition and emotion are at the heart of WASABI's impact simulation. The architecture uses the PAD (Pleasure–Arousal–Dominance) space as a way of representing key emotions in more than one dimension. This paradigm enables the mapping of emotional states onto a continuous space, which makes it easier to transition between and combine distinct emotional states.

A clear illustration of this approach can be found in the WASABI Thesis diagrams, such as the “dynamics / mood” figures (see Figure 2), which depict the interaction of emotions and mood over time and how boredom is modeled as a region in PAD space. By referencing such diagrams, it becomes apparent that the agent's emotional responses are both dynamic (i.e., they change with ongoing events) and structured according to the PAD mapping, making the simulation adaptive and realistic.

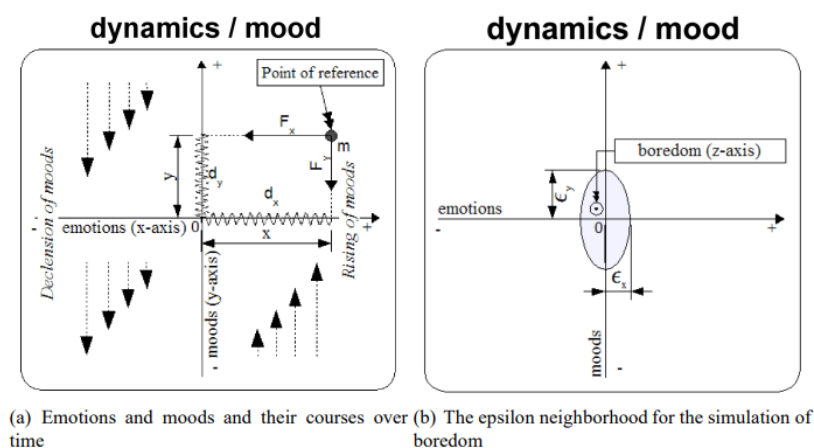


**Fig.2.** Internals of the emotion dynamics component [1].

Primary emotions are simulated through dynamic processes that account for both activation and decay, ensuring that emotional responses are neither static nor disconnected from ongoing events. The design also includes secondary emotions like hope, confirmed fear, and relief, by

describing where they are in PAD space and modeling how they arise through complex cognitive assessments. This layered method allows WASABI to capture both quick, reflexive emotional responses and more complex, cognitively mediated affective states.

A number of well-planned experiments were used to test the WASABI architecture in real-life settings. The virtual person MAX was used in two main ways: as a guide at a museum and as a player in the card game Skip-Bo. These scenarios were chosen to see how the agent would react emotionally and how well it could interact in both structured and changing contexts. Data collection considered both behavioral and physiological variables. In the Skip-Bo experiment, skin conductance (SC) and electromyography (EMG) sensors were used to collect physiological data from participants. The collected physiological signals were normalized and analyzed to assess whether the agent's simulated emotions matched the human users' real-time emotional responses. The analysis involved comparing vocal and nonverbal emotional displays with physiological signs of emotion in human users. This multimethod evaluation provided insight into how believable and effective WASABI's emotion simulation is, as well as how effectively it can help people connect with each other [2].

The architecture is modular, comprising distinct cognition and emotion modules that interact seamlessly to produce emotionally aware behavior.

**Cognition Module.** The cognition module is built on a BDI (Belief–Desire–Intention) framework, utilizing WBS agents (World, Belief, and Skill) for planning and decision-making, especially for the Skip-Bo scenario. The implementation leverages the JAM (Java Agent Model) platform, enabling flexible and robust agent behavior. This module is responsible for high-level reasoning, goal management, and the generation of expectations that can trigger secondary emotions. As illustrated in Figure 3 of Becker-Asano's WASABI architecture, the cognition module integrates both a reasoning and a reactive layer, feeding the emotion module with input, which highlights how tightly cognition and affective processes are coupled in this system [2].

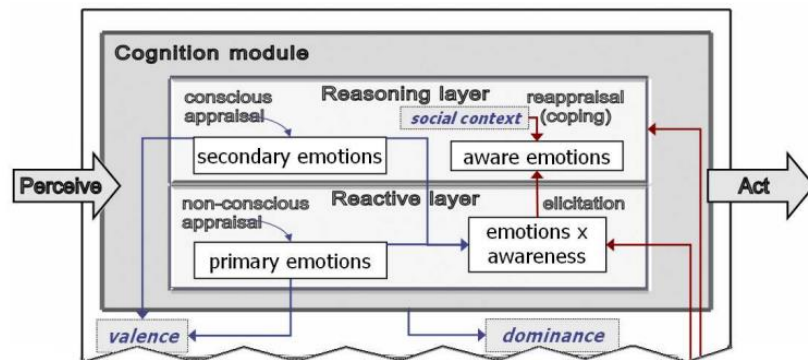


**Fig.3.** The cognition module of the WASABI architecture consisting of a reasoning layer and a reactive layer both of which feed the emotion module with input [1].

**Emotion Module.** The emotion module manages the simulation of both primary and secondary emotions. It calculates awareness likelihoods, defined as the probability that a particular emotion becomes consciously accessible to the agent, based on the current internal and external conditions. The module includes a graphical user interface (PADControl), which allows visualization and manipulation of the agent's affective state in PAD space, as depicted in Figure 4. This highlights the mapping of pleasure, arousal, and dominance dimensions to the agent's mood dynamics and awareness likelihoods, further emphasizing the coupling between emotion and cognition [2].

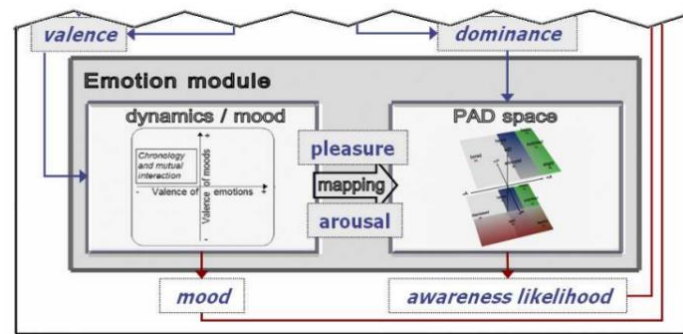


**Fig.4.** The emotion module of the WASABI architecture [1].

**Information Flow and Integration.** The integration of cognition and emotion is orchestrated through a well-defined information flow, as illustrated in Figure 5. The sequence diagram details the interactions between the BDI Agent, Emotion Agent, and Vis Agent, which is responsible for visual expression. This architecture ensures that cognitive appraisals can influence emotional states, and these in turn modulate the agent's behavior and expressive output. By combining robust theoretical models, empirical data collection, and a modular system design, the WASABI architecture provides a comprehensive framework for simulating emotionally-aware virtual agents, advancing the state-of-the-art in affective computing and human-computer interaction [2].

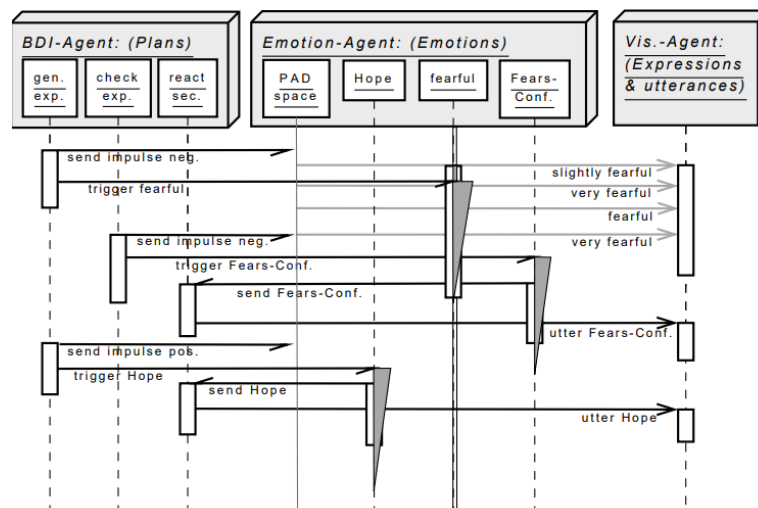


**Fig.5:** Sequence diagram of the information flow between the WBS-agents in Skip-Bo [1].

By combining robust theoretical models, empirical data collection, and a modular system design, the WASABI architecture provides a comprehensive framework for simulating emotionally-aware virtual agents. This methodological rigor underpins the architecture's capacity to advance the state-of-the-art in affective computing and human-computer interaction.

**Summary.** Empirical studies with the WASABI architecture demonstrated that integrating secondary emotions into the MAX virtual human significantly improved the believability and engagement of user interactions. Physiological tests such as skin conductance and electromyography showed that users did indeed respond to MAX's emotional displays, especially when the emotional expressions matched the game's setting. User feedback indicated that secondary emotions made MAX seem more mature and relatable, which addressed the problem of it appearing too childish or exaggerated when only primary emotions were employed [3].

WASABI is better at simulating emotions in a way that adapts to the situation than older affective designs like H-CogAff, FLAME, EMA, and Soar-Emote. Prior systems often relied on

static or rule-based models, limiting their adaptability and realism. WASABI's use of PAD space and the inclusion of additional emotions made agent behavior more fluid, believable, and context-appropriate, especially in learning and interaction settings. WASABI's use of psychology, neurobiology, and cognitive science together advance both the scientific understanding and practical application of emotionally-aware AI. The architecture's ability to provide complex, adaptive emotional reactions is especially useful for AI simulations in education and HCI, where empathy and engagement are key for learning. WASABI sets the stage for more natural, trustworthy, and meaningful connections between people and agents in the real world by allowing agents to maintain and evolve affective states across interactions [3].

The WASABI architecture is a significant advancement in the development of virtual agents capable of understanding and responding to emotions. Its main accomplishments include demonstrating that combining primary and secondary emotions leads to more believable and relatable agent behavior, as evidenced by user studies with the MAX agent. Additionally, it grounds the model's development in interdisciplinary research, enhancing both scientific validity and practical applicability. The architecture's modular design, which separates cognitive and emotional components, also contributes to greater adaptability and reliability in affective computing [3].

Building on WASABI, future research should focus on the modeling of more complex emotions, including those relevant to social and moral contexts, to enrich interactions with agents. Emotionally-aware agents should be tested in real-world settings like schools and hospitals to assess their long-term impact on learning and support. Developing systems that allow agents to adapt emotionally over time and across situations will support the development of more stable human-agent relationships. Additionally, ethical and privacy concerns must be addressed by establishing clear rules for data consent and protection. Overall, WASABI paves the way for adaptive, realistic, and ethically responsible AI in education and beyond [3].

## References

1. Becker-Asano, C.. (2008). The WASABI framework: Agent architecture with emotion, University Bielefeld, Technical Faculty, Doctoral dissertation.
2. Becker-Asano, C., & Wachsmuth, I.. (2010). Affective computing with primary and secondary emotions in a virtual human. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 20(1) 32–49, Bielefeld, Germany: Springer Science
3. Becker-Asano, C.. (2013). WASABI for affect simulation in human-computer interaction: Architecture description and example applications, Albert-Ludwigs-University of Freiburg, Department of Computer Science, Freiburg, Germany

## EMOSİYALARI NƏZƏRƏ ALAN SÜNİ İNTELLEKT SİMULYATORLARI: WASABI ARXİTEKTURASININ TƏDQİQATI

Mustafayeva E.E.

**Xülasə.** Məqalə insan-kompüter qarşılıqlı əlaqəsini yaxşılaşdırmaq üçün emosional süni intellektin necə işlədiyini araşdırır. Ənənəvi sistemlərdə real emosional modelləşdirmə çatışmazlığı istifadəçi əlaqəsini məhdudlaşdırır. Christian Becker-Asano tərəfindən hazırlanmış WASABI arxitekturası emosional prosesləri virtual agentlərə psixologiya və idrak elmləri əsasında inteqrasiya edir. O, xoşbəxtlik və narahatlıq kimi emosiyaları simulyasiya etmək üçün PAD məkanından istifadə edir. MAX agentı muzey bələdçisi və oyun kontekstlərində sınaqdan keçirilmiş, inandırıcılıq və istifadəçi əlaqəsinin artdığı müşahidə olunmuşdur, bu da fizioloji reaksiyalarla təsdiqlənmişdir. Tədqiqat, WASABI-nin təhsil və qarşılıqlı əlaqə sahəsindəki potensialını



vurğulayır, həmçinin emosional məlumatların toplanması ilə bağlı etik məsələlərə və daha inkişaf etmiş emosional modelləşdirmə ehtiyacına diqqət çəkir.

**Açar sözlər:** emosional cəhətdən məlumatlı SI, virtual agentlər, WASABI arxitekturası, PAD modeli, insan-kompüter qarşılıqlı əlaqəsi (İKQƏ), emosiyaya duyarlı hesablama, MAX (Multimodal Assembly eXpert)

## RƏQƏMSAL İQTİSADİYYATDA SÜNİ İNTELLEKTİN ROLU



**Quliyeva C.N.**

Azərbaycan Memarlıq və İnşaat Universiteti, Bakı, Azərbaycan  
cahan.quliyeva0901@mail.ru

**Xülasə.** Rəqəmsal transformasiya dövründə süni intellektin iqtisadi sahələrə təsiri sürətlə artır. Müasir iqtisadiyyatın dinamik strukturu və rəqəmsallaşmanın dərinləşməsi süni intellektin rolunu sadəcə texnoloji yenilik kimi deyil, eyni zamanda iqtisadi strategiyaların əsas komponenti kimi ön plana çıxarır. Bu baxımdan süni intellektin rəqəmsal iqtisadiyyat kontekstində əhəmiyyətinin təhlili mühüm aktuallıq kəsb edir. İlk növbədə, süni intellekt texnologiyaları istehsal səmərəliliyinin yüksəldilməsi, əməliyyatların avtomatlaşdırılması və xərclərin azaldılması vasitəsi ilə müəssisələrin rəqəbatqabiliyyətini artırır. Bu, xüsusilə emal sənayesi, nəqliyyat-logistika və maliyyə sektorlarında özünü daha qabarıq göstərir. Süni intellekt əsaslı qərarqəbuletmə sistemləri və məlumat analitikası rəqəmsal iqtisadiyyatın əsas komponentlərinə çevrilərək resursların daha optimal idarə olunmasına imkan verir. Bundan əlavə, süni intellekt insan əməyinə olan tələbatın dəyişməsi ilə əmək bazarında struktur transformasiyalara səbəb olur. Yeni peşə sahələrinin yaranması və ənənəvi iş növlərinin avtomatlaşdırılması iqtisadiyyatın strukturuna, təhsil sistemində və sosial siyasətə birbaşa təsir göstərir. Bu isə dövlət siyasətində innovasiyaların təşviqi, rəqəmsal savadlılığın artırılması və yeni texnologiyalara adaptasiyanı vacib edir. Süni intellekt həmçinin iqtisadi idarəetmənin də səmərəliliyini artırır. Verilənlərə əsaslanan analitik sistemlər iqtisadi planlaşdırma, fiskal və monetar siyasətin daha dəqiq həyata keçirilməsi üçün imkanlar yaradır. Hökumətlər, süni intellekt texnologiyalarından istifadə etməklə rəqəmsal iqtisadiyyatın tənzimlənməsində çeviklik və proqnozlaşdırma imkanlarını genişləndirirlər. Nəhayət, süni intellektin tətbiqi inklüziv və dayanıqlı inkişaf məqsədlərinin reallaşdırılmasına da töhfə verir. Ağıllı kənd təsərrüfatı, enerji səmərəliliyi və şəhər infrastrukturunun idarə olunması kimi sahələrdə tətbiq olunan süni intellekt həlləri uzunmüddətli iqtisadi inkişaf üçün yeni perspektivlər açır. Bu kontekstdə, rəqəmsal iqtisadiyyatda süni intellektin rolunun araşdırılması, həm elm, həm də siyasət baxımından zəruridir. Əldə olunan nəticələr dövlətlərə, müəssisələrə və cəmiyyətə rəqəmsal transformasiya prosesində düzgün strategiyalar qurmağa kömək edir.

**Açar sözlər:** iqtisadi inkişaf, informasiya, qərarvermə, effektivlik, rəqəbatlılıq.

**Giriş.** Rəqəmsal iqtisadiyyat müasir iqtisadi inkişafın əsas istiqamətlərindən biridir və onun formalaşmasında texnoloji yeniliklər, xüsusilə süni intellekt (Sİ), mühüm rol oynayır. Süni intellekt informasiya texnologiyalarının inkişafı ilə əlaqədar ortaya çıxan və böyük həcmli məlumatların təhlili, avtomatlaşdırılmış qərar qəbuletmə və intellektual proseslərin həyata keçirilməsində istifadə olunan qabaqcıl alqoritmlər toplusudur. Rəqəmsal iqtisadiyyatda Sİ-nin rolu təkcə iqtisadi proseslərin səmərəliliyinin artırılması ilə məhdudlaşmır, həm də yeni biznes modellərinin yaranmasına, rəqəbat üstünlüklərinin təmin olunmasına və iqtisadi fəaliyyətin keyfiyyətə yeni səviyyəyə qalxmasına şərait yaradır.

Süni intellektin tətbiqi rəqəmsal iqtisadiyyatın müxtəlif sahələrində – maliyyə xidmətlərindən tutmuş, pərakəndə satış, logistika, istehsal və xidmət sektorlarına qədər geniş yayılmışdır. Bu texnologiya müəssisələrə bazar dəyişikliklərinə daha çevik reaksiya vermək, istehlakçı

davranışlarını daha dərindən analiz etmək və resurslardan daha optimal istifadə etmək imkanı yaradır. Eyni zamanda, Sİ rəqəmsal transformasiyanın təməl daşı kimi iqtisadiyyatın rəqəmsallaşmasının sürətlənməsində, innovasiyaların təşviqində və dayanıqlı inkişafın təmin olunmasında əsas amillərdən biridir. Beləliklə, rəqəmsal iqtisadiyyatda süni intellekt həm iqtisadi artımın yeni mənbəyi, həm də rəqəmsal dövrdə iqtisadi sistemin transformasiyasının mühüm katalizatorudur. Onun rolu və təsiri gələcək iqtisadi inkişaf strategiyalarının hazırlanmasında və icrasında aparıcı mövqe tutmaqda davam edəcək [1].

**Metodologiya.** Bu tədqiqatda rəqəmsal iqtisadiyyatın inkişafında süni intellektin rolunu dərin və sistemli şəkildə təhlil etmək üçün integrativ yanaşma tətbiq edilmişdir. İlk növbədə, mövcud elmi ədəbiyyatın geniş nəzərdən keçirilməsi həyata keçirilmiş, beynəlxalq və yerli mənbələrdən alınan statistik məlumatlar toplanaraq analitik müstəvidə qiymətləndirilmişdir. Bu prosesdə iqtisadiyyatın müxtəlif sahələrində süni intellektin tətbiq sahələri və onların iqtisadi təsirləri fərqli kontekstlərdə müqayisəli təhlil olunmuşdur. Tədqiqatda həmçinin sistemli məzmun təhlili metodu istifadə edilmişdir. Bu metod vasitəsilə süni intellektin rəqəmsal iqtisadiyyatın əsas sektorlarında (məsələn, maliyyə, ticarət, logistika və sənaye) tətbiq olunma səviyyəsi və bunun iqtisadi effektivliyə təsiri qiymətləndirilmişdir. Analiz əsasında süni intellektin iqtisadiyyatın rəqəmsallaşmasında yarada biləcəyi innovasiya potensialı, məhsuldarlığın artırılması və resursların optimallaşdırılması kimi əsas amillər müəyyən edilmişdir.

Bundan əlavə, süni intellektin tətbiqi ilə bağlı empirik məlumatların toplanması üçün keyfiyyət və kəmiyyət metodları kombinasiyası seçilmişdir. Rəqəmsal iqtisadiyyatın inkişafında iştirak edən müəssisələrdən sorğular, ekspert müsahibələri və mövcud iqtisadi göstəricilərin statistik təhlili aparılmışdır. Bu yanaşma tədqiqatın elmi əsaslılığını və nəticələrin praktik tətbiq imkanlarını artırmışdır.

Süni intellektin yaradılması və inkişafı, elmi-texnoloji tərəqqinin ən önəmli nailiyyətlərindən biri kimi qiymətləndirilir. Lakin bu sahədə aparılan tədqiqatlar və tətbiqlər cəmiyyətin müxtəlif kəsimlərində bir sıra ziddiyyətli yanaşmaların formalaşmasına səbəb olmuşdur. Bu yanaşmaların iki əsas kateqoriyası – optimist və pessimist mövqelər – bu texnologiyanın hazırkı və gələcək təsirlərinə dair fərqli baxış bucaqlarını əks etdirir.

Optimist yanaşmaya əsasən, süni intellekt insan həyatının keyfiyyətini yüksəldəcək, istehsal səmərəliliyini artıracaq, səhiyyə, təhsil və sosial xidmətlərdə inqilabi dəyişikliklərə səbəb olacaqdır. Bu baxımdan Sİ-nin cəmiyyətə integrasiyası, texnoloji imkanların genişlənməsi və yeni ixtisasların yaranması ilə müşayiət olunur. Süni intellektin qərarların qəbulunda obyektivliyi təmin edəcəyi, rutin işləri avtomatlaşdıracağı və insanlara daha yaradıcı fəaliyyətlər üçün imkan yaradacağı düşünülür. Bununla yanaşı, pessimist yanaşmalar süni intellektin potensial risklərini qabardır. Belə yanaşmalara görə, texnoloji inkişaf iş yerlərinin avtomatlaşdırılması ilə işsizliyin artmasına, sosial bərabərsizliyin dərinləşməsinə və hətta bəzi hallarda fərdi hüquq və azadlıqların məhdudlaşdırılmasına səbəb ola bilər. Digər narahatlıqlar isə etik məsələlərlə, nəzarətdən çıxmış Sİ sistemlərinin təhlükələri ilə, eləcə də Sİ-nin süni şüur formalaşdıraraq insan iradəsinə təsir imkanları ilə bağlıdır. Pessimistlər, həmçinin, böyük texnologiya şirkətlərinin Sİ üzərində hegemonluğunun siyasi və iqtisadi sistemlər üzərində təsir gücünü artıracağından ehtiyat edirlər.

Ümumilikdə, optimist və pessimist yanaşmalar süni intellektin ikili təbiətini – həm potensial imkanlarını, həm də təhlükələrini – ortaya qoyur. Cəmiyyətin bu texnologiyaya münasibəti yalnız onun texniki imkanları ilə deyil, həm də etik, hüquqi və sosial yanaşmalarla müəyyən edilir. Ona görə də süni intellektin inkişafı prosesində yalnız elmi deyil, həm də ictimai diskussiyalara əsaslanan balanslı strategiyaların formalaşdırılması zəruridir [2].

Süni intellektin tətbiqi imkanları ilk növbədə informasiya texnologiyalarının inkişaf səviyyəsi və rəqəmsal infrastrukturun mövcudluğu ilə sıx bağlıdır. Azərbaycanda son illərdə bu sahədə həyata keçirilən islahatlar və texnoloji yatırımlar, xüsusilə internet şəbəkəsinin genişlənməsi, rəqəmsal

dövlət xidmətlərinin inkişafı, bulud texnologiyalarının tətbiqi və data mərkəzlərinin qurulması süni intellektin tətbiqini mümkün edən əsas şərtlərdəndir. Bununla yanaşı, ölkədə fəaliyyət göstərən universitetlər və elmi-tədqiqat müəssisələrinin bu sahədə elmi potensialı, beynəlxalq əməkdaşlıqlar və innovativ startap mühiti də bu imkanları daha da genişləndirir.

Süni intellektin iqtisadi sektorlarda tətbiqi, xüsusilə sənaye, kənd təsərrüfatı, nəqliyyat və enerji kimi sahələrdə istehsal effektivliyini artırmaq, xərcləri azaltmaq və idarəetmədə operativliyi təmin etmək üçün mühüm imkanlar yaradır. Məsələn, aqrar sahədə süni intellekt əsaslı sensorlar və dronlar vasitəsilə torpaq məhsuldarlığının analizi və proqnozlaşdırılması, urbanizasiya və ətraf mühitin monitorinqi sahələrində isə Sİ əsaslı sistemlərin tətbiqi davamlı inkişaf baxımından vacibdir. Eyni zamanda səhiyyə sistemində Sİ texnologiyalarının diaqnostika, müalicə və xəstəliklərin proqnozlaşdırılması proseslərinə integrasiyası daha effektiv tibbi xidmət göstərilməsinə imkan yaradır.

İdarəetmə və rəqəmsal hökumət sahəsində süni intellektin tətbiqi isə vətəndaşlara göstərilən xidmətlərin şəffaflığını, sürətini və əlçatanlığını artırmaqla bərabər, qərarvermə proseslərində daha analitik və məlumatlara əsaslanan yanaşmaların formalaşmasına səbəb olur. Bu isə dövlət idarəçiliyinin modernləşdirilməsinə və resursların daha səmərəli istifadəsinə şərait yaradır. Bununla belə, Azərbaycanda süni intellektin geniş miqyasda tətbiqi üçün bəzi çağırışlar da mövcuddur. Ən başlıca maneələrdən biri ixtisaslı insan kapitalının məhdudluğu, data etikasına dair normativ çərçivələrin tam formalaşmaması və süni intellekt sahəsində yerli texnoloji istehsal və innovasiyaların yetərinə inkişaf etməməsidir. Bütün bu faktorlar nəzərə alındıqda, süni intellektin tətbiqi imkanlarının reallaşdırılması məqsədilə dövlət, biznes və akademik qurumlar arasında koordinasiyalı fəaliyyətin genişləndirilməsi, normativ hüquqi bazanın təkmilləşdirilməsi, insan resurslarının inkişafına yönəlmiş strategiyaların həyata keçirilməsi zəruridir. Azərbaycanda süni intellektin tətbiqi imkanları real, perspektivli və strateji baxımdan vacib istiqamət olmaqla yanaşı, ölkənin innovativ inkişaf modelinə keçidində mühüm amildir. Bu sahədə atılacaq sistemli addımlar və elmi-praktik yanaşmalar gələcəkdə Azərbaycanın regional innovasiya mərkəzinə çevrilməsini stimullaşdırır [3].

Süni intellekt texnologiyaları istehsalatda müxtəlif mərhələlərdə – dizayn, planlaşdırma, istehsalın idarə olunması, keyfiyyətin nəzarəti və texniki xidmət kimi sahələrdə tətbiq oluna bilər. Bu texnologiyalar sayəsində avtomatlaşdırma səviyyəsi artır, insan səhvləri azalır, məhsulun keyfiyyəti yüksəlir və xərclər minimuma endirilir. Sİ-nin ən mühüm xüsusiyyətlərindən biri böyük həcmli məlumatları analiz etmə, öyrənmə və qərarvermə imkanlarına malik olmasıdır. Bu imkanlar onu istehsal zəncirinin bütün mərhələlərində çevik və effektiv qərarların verilməsi üçün əvəzsiz vasitəyə çevirir.

İstehsalat sahəsində Sİ-nin tətbiqi həmçinin “ağıllı fabriklər” və “sənaye 4.0” konsepsiyalarının reallaşdırılmasında mühüm rol oynayır. Bu yanaşma sayəsində istehsal sistemləri real vaxt rejimində məlumatları toplaya və analiz edə bilər, bunun nəticəsində proseslər dinamik şəkildə optimallaşdırılır. Belə bir transformasiya isə ənənəvi istehsal modellərinin dəyişməsinə və rəqəmsal iqtisadiyyatın tələblərinə uyğunlaşmasına imkan yaradır. Süni intellektin istehsalatda tətbiqi eyni zamanda dayanıqlılıq və ekoloji baxımdan da üstünlüklər yaradır. Resursların səmərəli istifadəsi, tullantıların azaldılması və enerji sərfiyyatının optimallaşdırılması bu texnologiyanın tətbiqi nəticəsində əldə edilə bilən mühüm nəticələndir. Bu isə yalnız iqtisadi baxımdan deyil, sosial və ekoloji məsuliyyət baxımından da əhəmiyyətlidir.

Azərbaycan reallığında bu istiqamətdə ilk addımlar atılmış, bəzi iri müəssisələr Sİ texnologiyalarını tətbiq etməyə başlamışdır. Lakin hələ də texnoloji infrastruktura, ixtisaslı kadrlara və innovasiya mühitinə olan ehtiyaclar bu prosesin genişlənməsində əsas məhdudlaşdırıcı amillər kimi qalmaqdadır. Dövlət səviyyəsində bu sahədə dəstəkləyici siyasətlərin həyata keçirilməsi,

tədqiqat və inkişaf fəaliyyətlərinin stimullaşdırılması, həmçinin təhsil sisteminin uyğunlaşdırılması bu imkanların reallaşdırılmasında həlledici rol oynayacaqdır.

Süni intellektin istehsalata tətbiqi yalnız texnologiyanın inkişafı deyil, ümumilikdə ölkənin sənaye potensialının yüksəldilməsi, beynəlxalq rəqabətdə mövqe qazanması və dayanıqlı iqtisadi artımın təmin olunması baxımından da mühüm əhəmiyyət daşıyır. Bu baxımdan, süni intellektin tətbiqi imkanlarının elmi əsaslandırılması və praktik həyata keçirilməsi qarşıdakı dövrdə tədqiqatların və qərarverici siyasətlərin əsas istiqamətlərindən biri olmalıdır [4].

**Nəticə.** Rəqəmsal iqtisadiyyatın sürətli inkişafı süni intellekt texnologiyalarının tətbiqini zəruri edib. Süni intellekt iqtisadiyyatın müxtəlif sahələrində məhsuldarlığın və səmərəliliyin artırılmasına, qərar qəbul etmənin optimallaşmasına, bazar analizlərinin daha dəqiq aparılmasına və yeni innovativ xidmətlərin yaradılmasına imkan verir. Süni intellektin tətbiqi rəqəmsal iqtisadiyyatın rəqabət qabiliyyətini yüksəldir və iqtisadi proseslərin daha çevik idarə olunmasına şərait yaradır. Eyni zamanda, süni intellektin rolu iqtisadiyyatın rəqəmsallaşması və avtomatlaşdırılması ilə əlaqədar əməyin strukturunu dəyişdirir, yeni peşə və bacarıqların formalaşmasını tələb edir. Nəticə olaraq, süni intellekt rəqəmsal iqtisadiyyatın əsas hərəkətverici qüvvələrindən biri olaraq dayanıqlı inkişafın təmin edilməsində və iqtisadiyyatın transformasiyasında kritik əhəmiyyət kəsb edir. Bu rolun tam reallaşması üçün süni intellekt texnologiyalarının etik, hüquqi və sosial aspektlərinin nəzərə alınması da vacibdir.

#### Ədəbiyyat

1. Əliyev, R. M. (2021). Süni intellekt və rəqəmsal iqtisadiyyatın inkişaf perspektivləri. Azərbaycan İqtisad Jurnalı, s.45-58.
2. Məmmədova, A. N. (2020). Rəqəmsal iqtisadiyyatda süni intellektin tətbiqi və onun iqtisadi effektivliyə təsiri. Bakı Dövlət Universitetinin İqtisadiyyat Fakültəsi Elmi Əsərləri, s.89-103.
3. Hüseynov, E. S. (2019). Azərbaycan iqtisadiyyatında süni intellekt texnologiyalarının rolu. Azərbaycan Texniki Universiteti Elmi Jurnalı, s.120-130.
4. Quliyev, T. R. (2022). Rəqəmsal iqtisadiyyatda süni intellektin tətbiqi: çağırışlar və imkanlar. İqtisadiyyat və İnnovasiya Jurnalı, s.25-39.

## THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DIGITAL ECONOMY

Quliyeva C.N.

**Abstract.** *In the era of digital transformation, the impact of artificial intelligence on economic sectors is rapidly increasing. The dynamic structure of the modern economy and the deepening of digitalization bring the role of artificial intelligence to the fore not only as a technological innovation, but also as a key component of economic strategies. In this regard, the analysis of the importance of artificial intelligence in the context of the digital economy is of great relevance. First of all, artificial intelligence technologies increase the competitiveness of enterprises by increasing production efficiency, automating operations and reducing costs. This is especially evident in the processing industry, transport and logistics and financial sectors. Artificial intelligence-based decision-making systems and data analytics have become the main components of the digital economy, allowing for more optimal management of resources. In addition, artificial intelligence causes structural transformations in the labor market by changing the demand for human labor. The emergence of new professional fields and the automation of traditional types of work directly affect the structure of the economy, the education system and social policy. This makes it important to promote innovation in public policy, increase digital literacy and adapt to new technologies. Artificial intelligence also increases the efficiency of economic management. Data-driven analytical systems create opportunities for more accurate implementation of economic planning, fiscal and*



*monetary policy. Governments, using artificial intelligence technologies, expand their flexibility and forecasting capabilities in regulating the digital economy. Finally, the application of artificial intelligence also contributes to the realization of inclusive and sustainable development goals. Artificial intelligence solutions applied in areas such as smart agriculture, energy efficiency and urban infrastructure management open up new prospects for long-term economic development. In this context, investigating the role of artificial intelligence in the digital economy is necessary both from a scientific and political perspective. The results obtained help states, enterprises and society to build the right strategies in the digital transformation process.*

**Keywords:** economic development, information, decision-making, efficiency, competitiveness.

## BANK SEKTORUNDA DAVRANIŞ VƏ İMZA TƏSVİRLƏRİNƏ ƏSASLANAN RFMI MODELİ İLƏ MÜŞTƏRİ KLASTERLƏŞDİRMƏ VƏ ANOMALIYA AŞKARLANMASI



**Rəhimov M.E.**

Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan  
musa.rahimov@student.aztu.edu.az

**Xülasə.** Bu tədqiqat bank sektorunda müştəri segmentasiyasını daha dəqiq həyata keçirmək məqsədilə RFM (Recency, Frequency, Monetary) modelinə vizual imza xüsusiyyətlərinin integrasiyasının təsirini araşdırır. Ənənəvi RFM yanaşması alış-veriş davranışlarını ümumiləşdirməkdə faydalı olsa da, klasterlər arasında aydın sərhədlərin müəyyən olunmasında məhdudiyyətlər müşahidə edilmişdir. Bu çətinliyi aradan qaldırmaq üçün hər bir istifadəçiyə məxsus vizual imzalardan çıxarılan dörd əsas xüsusiyyət – orta piksel sıxlığı (AvgPixelDensity), kontur sayı (AvgNumContours), kontur sahəsi (AvgBoundingArea) və xətt qalınlığı (AvgStrokeWidth) – əsasında yeni göstərici formalaşdırılmış və RFM modelinə əlavə edilmişdir. Nəticədə yaranan genişləndirilmiş RFMI modeli həm Silhouette Score, həm Calinski-Harabasz Index, həm də Davies-Bouldin Index üzrə daha üstün nəticələr təqdim etmişdir. Məsələn, Silhouette Score 0.3963-dən 0.5849-a, Calinski-Harabasz Index isə 808.16-dən 3404.71-ə qədər yüksəlmiş, Davies-Bouldin Index isə 0.7654-dən 0.5139-a enmişdir. Bundan əlavə, Z-score əsasında həyata keçirilən anomaliya aşkarlanmasında RFMI modeli ilə aşkarlanan müşahidələrin klaster daxilində və klasterlərarası vizual fərqliliyi daha yüksək olmuşdur. Araşdırmanın nəticələri göstərir ki, vizual davranış nümunələrinin daxil edilməsi segmentasiya prosesinin keyfiyyətini əhəmiyyətli dərəcədə artırır və bank xidmətlərinin fərdiləşdirilməsi, risklərin aşkarlanması və məqsədyönlü kampaniyaların planlaşdırılması üçün daha əlverişli zəmin yaradır.

**Açar sözlər:** müştəri segmentasiyası, RFM modeli, RFMI modeli, K-Means klasterləşdirmə, Silhouette Score, Calinski-Harabasz Index, Davies-Bouldin Index, Z-score

**Giriş.** Müasir dövrdə banklar arasındakı rəqabətin yüksək olması müştəri davranışlarının daha dəqiq dəyərləndirməsinə və fərdi yanaşmaların tətbiq edilməsinə zəruri edir. Müştəri segmentasiyası bu məqsədlə istifadə olunan effektiv yanaşmalardan biri kimi çıxış edir və əsas məqsədi eyni xüsusiyyətlərə sahib olan istifadəçiləri qruplaşdırmaqla fərqli strategiyaların tətbiqinə şərait yaratmaqdır [1]. Ənənəvi segmentasiya üsullarından biri olan RFM (Recency, Frequency, Monetary) modeli müştərilərin sonuncu alış vaxtı, alış tezliyi və xərclədiyi məbləğ əsasında onları qruplaşdırmağa imkan verir [2].

RFM modeli sadə olsa da, bəzi hallarda müştərilərin davranış xüsusiyyətlərini daha dəqiq əhatə edə bilmir. Müştərilərin vizual məlumatlarının əldə edilməsinin asan olduğu rəqəmsal dövrdə bu əlamətlərin modelə əlavə edilməsi segmentasiya dəqiqliyini artırır [3]. Bu məqsədlə araşdırma çərçivəsində klassik RFM modelinə müştərinin rəqəmsal davranış əlamətlərini əks etdirən dörd vizual xüsusiyyət – AvgPixelDensity, AvgNumContours, AvgBoundingArea, AvgStrokeWidth əlavə olunaraq yeni RFMI (RFM + Image Signatures) modeli formalaşdırılmışdır.

Bu məqalənin əsas məqsədi, yenilikçi RFMI yanaşmasına əsasən yaradılmış klasterlərin və tapılmış anomaliya hallarının RFM modelinə nəzərən nə dərəcədə dəqiq olmasını tədqiq etməkdir.

**Metodologiya.** İstifadə olunan məlumat bazası, müştərilərin bank məhsulları üzrə alış-veriş fəaliyyətlərini əks etdirən transaksiyalardan ibarətdir. Məlumat dəsti altı əsas xüsusiyyətdən – müştərinin unikal kodu, əməliyyatın baş verdiyi tarix, əməliyyatın dəyəri, alınan məhsulun tipi,

sifariş nömrəsi və əməliyyatın baş verdiyi şəhərdən ibarətdir.

Bu məlumatlar müştərinin son alış tarixindən nə qədər vaxt keçdiyini, alışların ümumi sayını və maliyyə dəyərini hesablamağa imkan verir. Əldə olunan bu göstəricilər əsasında RFM (Recency, Frequency, Monetary) modeli qurulmuşdur. Model çərçivəsində hər bir müştəri üçün uyğun olaraq son dövrlərdə həyata keçirdiyi əməliyyatların vaxt baxımından nə qədər yaxın olduğunu (R), alış tezliyi (F) və ümumi xərcləmə miqdarı (M) müəyyən edilmiş, bu dəyərlər üzərində standartlaşdırma aparılmış və nəticədə RFM vektorları formalaşdırılmışdır. Bu model bəzi müştəri davranışlarındakı fərqləri tam nəzərə ala bilmədiyi üçün tədqiqat çərçivəsində müştəri imza xüsusiyyətlərinin modelə əlavə edilməsi ilə RFMI (Recency, Frequency, Monetary, Image-based features) modeli formalaşdırılmışdır.

Hər bir müştəri üçün alış zamanı sistemdə həyata keçirilən fərqli mərhələlərə uyğun olaraq (daxilolma, əməliyyat təsdiqi və sessiyanın sonlandırılması zamanı) üç fərqli vizual imza nümunəsi toplanmışdır. Bu imzalardan dörd əsas xüsusiyyət çıxarılmışdır:

1. AvgPixelDensity – Bu göstərici imza təsvirindəki qara piksellərin ümumi sahəyə nisbətini ölçür və imzanın ümumi sıxlığını, yəni nə qədər "dolu" və ya "boş" olduğunu təyin etməyə imkan verir.
2. AvgNumContours – İmza təsviri üzərində tətbiq edilən kontur aşkarlama metodları nəticəsində müəyyən olunan kontur strukturunun orta sayını ifadə edir. Bu göstərici imzanın mürəkkəbliyini və formasal müxtəlifliyini göstərir.
3. AvgBoundingArea – İmzanı təşkil edən konturların əhatələdiyi sahənin orta ölçüsünü təmsil edir. Bu parametrlər imzanın nə qədər yer tutduğunu və vizual olaraq yayılma səviyyəsini göstərir.
4. AvgStrokeWidth – Konturların uzunluqları və nöqtə sıxlıqları əsasında hesablanan orta xətt qalınlığıdır. Bu göstərici istifadəçinin imza atma üslubuna və əl hərəkətlərinin təbiətinə dair vizual ipucları verir.

Bu dörd xüsusiyyətin statistik olaraq orta qiymətlərinin hesablanaraq vahid "ImageFeaturesScore" dəyişəni yaradılmış və RFM göstəricilərinə əlavə edilmişdir. Beləliklə, hər bir müştəri üçün R, F, M, I dəyərləri toplanmış və RFMI modeli əsasında klasterləşdirmə aparılmışdır.

Araşdırmada müştəri seqmentasiyası üçün K-Means klasterləşdirmə modelindən istifadə olunmuşdur. Bu alqoritm verilmiş müşahidələri onların xüsusiyyətlərinə əsasən  $k$  sayda klasterə ayırır və məqsəd daxilindəki variasiyaları minimuma endirməkdir [4]. K-Means alqoritmi iterativ şəkildə çalışaraq klaster mərkəzlərini təyin edir və hər müşahidəni ona ən yaxın mərkəzə uyğun klasterə aid edir [5].

Klasterlərin qiymətləndirilməsi 3 metrik göstərici əsasında aparılmışdır:

1. Silhouette Score – Hər bir müşahidənin öz klasterinə olan bənzərliyi və digər klasterlərdən fərqliliyini ölçür. Skorun 1-ə yaxın olması klasterlərin aydın ayrıldığını göstərir [6].
2. Davies-Bouldin Index (DBI) – Klasterlərarası məsafə və daxilindəki variasiya əsasında hesablanır. Aşağı DBI dəyəri daha yaxşı klaster ayrımını ifadə edir [7].
3. Calinski-Harabasz Index (CHI) – Klasterlərarası ayrılma və klasterdaxili sıxlığın nisbətini ölçür. Yüksək dəyərlər klasterlərin daha yaxşı təşkil olunduğunu göstərir [8].

**Nəticə və müzakirələr.** RFM və RFMI modellərindən istifadə edərək müştəri seqmentasiyaları arasında müqayisə aparmaq üçün K-Means alqoritm 2-dən 10-a qədər klaster sayı ilə sınaqdan keçirilmiş, qiymətləndirmə metrikləri və daha ətraflı seqmentasiya ilə davranış fərqlərinin müəyyən olunması məqsədilə 4 klaster seçilmişdir. Bu model üçün əldə olunan qiymətləndirmə metrikləri aşağıdakı kimi olmuşdur:

Cədvəl 1  
RFM və RFMI modelləri üzrə  
klasterləşdirmə keyfiyyətinin müqayisəsi

| Qiymətləndirmə Metriki  | RFM    | RFMI    |
|-------------------------|--------|---------|
| Silhouette Score        | 0.3963 | 0.5849  |
| Davies- Baldwin Index   | 0.7654 | 0.5139  |
| Calinski-Harabasz Index | 808.16 | 3404.71 |

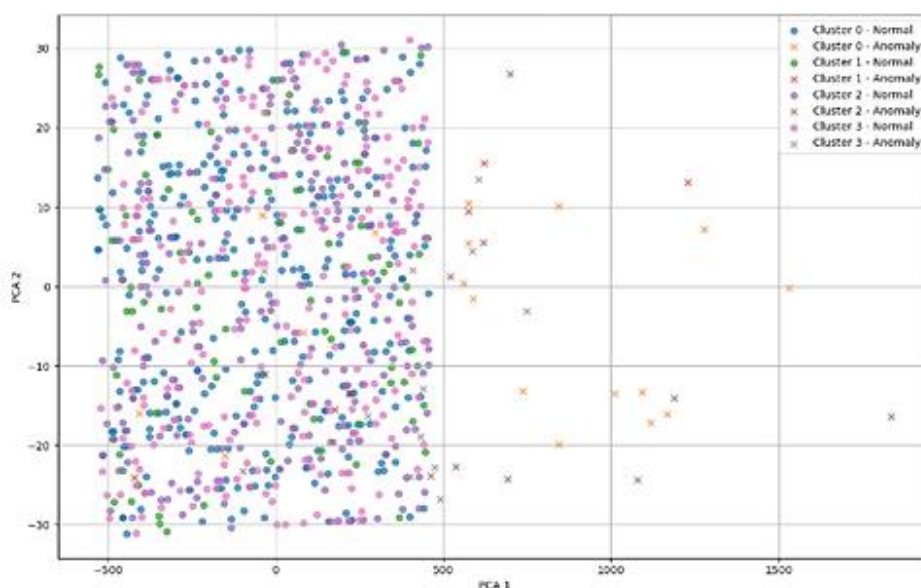
Cədvəl 1-ə əsasən görmək olar ki, RFM modeli klasterləri orta səviyyədə ayırd edə bilmişdir. Belə ki, bu modeldə Silhouette Score = 0.3963, Davies-Bouldin Index = 0.7654, və Calinski-Harabasz Index = 808.16 olmuşdur. Bu metriklər klasterlərəarası fərqlənmənin və daxilindəki kompaktlığın tam qənaətbəxş olmadığını göstərir. Bu səbəbdən daha dərin davranış fərqliliklərini aşkar etmək məqsədilə modellə əlavə vizual xüsusiyyətlər integrasiya edilmişdir.

Genişləndirilmiş model (RFMI) ilə klasterləşdirmə aparıldıqda Silhouette Score = 0.5849, Davies-Bouldin Index = 0.5139 və Calinski-Harabasz Index = 3404.71 kimi nəticələr əldə edilmişdir.

Əldə olunan bu nəticələr göstərir ki, RFMI modeli, RFM modelinə nisbətən daha aydın və fərqlənmiş klasterlər formalaşdırmışdır. Xüsusilə, Silhouette Score-da təqribən 0.19 vahid artım, Calinski-Harabasz Index-də isə 4 dəfəyə yaxın yüksəliş müşahidə olunmuşdur. Bu isə klasterlərin daha dəqiq və məntiqi qurulduğunu göstərir. Eyni zamanda, Davies-Bouldin Index-in 0.7654-dən 0.5139-a qədər azalması klasterlərəarası oxşarlığın azaldığını, yəni qrupların bir-birindən daha fərqli və yaxşı ayrıldığını ifadə edir.

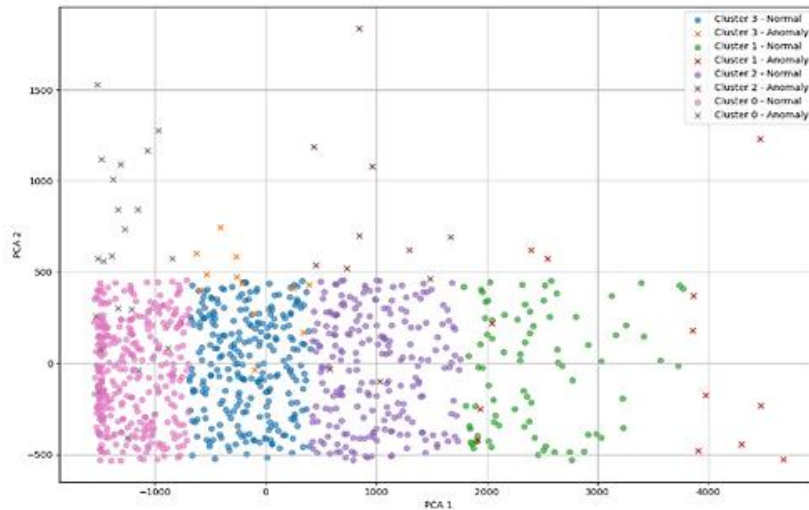
Bu fərqlər göstərir ki, istifadəçi imzaları əlavə olunmuş RFMI modeli ilə aparılmış seqmentasiya yalnız maliyyə və alış davranışlarına əsaslanan modelin seqmentasiyasına nəzərən daha dəqiq nəticələr verir.

RFM və RFMI modelləri əsasında aparılmış seqmentasiya əsasında klasterlərin ayırımını və bu mərhələdən sonra anomaliyaların tapılma effektivliyini göstərmək üçün nəticələr vizuallaşdırılmışdır.



Şəkil 1. RFM modeli üzrə müştəri klasterlərində anomaliyaların PCA ilə vizual təsviri

Şəkil 1-də RFM göstəricilərinə əsaslanan anomaliyaların klasterlər üzrə vizual təsviri təqdim olunmuşdur. Z-score statistikasına əsasən, hər bir xüsusiyyət üzrə ortalamadan 3 standart sapma uzaqlıqda yerləşən müşahidələr anomaliya kimi qəbul edilmişdir. PCA ilə iki əsas komponentə endirilmiş məlumatda müşahidə olunur ki, bəzi anomaliya kimi qiymətləndirilən müştərilər digər müştərilərlə çox yaxın vizual sahələrdə yerləşdiyi üçün ayırıcılıq problemi müşahidə olunur.



**Şəkil 2.** RFMI modeli üzrə müştəri klasterlərində anomaliyaların PCA ilə vizual təsviri

Şəkil 2-yə əsasən müşahidə olunur ki, RFM və vizual imza xüsusiyyətlərinin birgə istifadə olunduğu RFMI modeli, anomaliyaları daha dəqiq və aydın şəkildə ayırd edə bilər. Xüsusilə 0 və 2-ci klasterlərdə anomaliyaların daha çox toplanması bu klasterlərin daxilində davranış və vizual göstəricilər baxımından kəskin fərqliliklərin olduğunu göstərir. RFM modelində yaxın sahələrdə yerləşən və fərqləndirilməsi çətin olan bəzi nümunələr, RFMI modeli ilə açıq şəkildə ayrılmışdır. Bu isə vizual imza əsaslı integrasiyanın modellə tanınması çətin olan müştəri fərqlərini üzə çıxarmaqda effektiv olduğunu təsdiqləyir. Anomaliya sayı RFM modelində 51 olduğu halda, RFMI modelində bu göstərici 57-yə yüksəlmişdir ki, bu da əlavə fərqliliklərin aşkara çıxarıldığını göstərir.

**Yekun.** Öldə olunan yekun nəticələr göstərir ki, müştəri qruplaşdırmasında yalnız maliyyə əsaslı RFM göstəricilərindən əlavə, istifadəçilərin müxtəlif periodlarda toplanmış imzaları əsasında çıxarılan vizual xüsusiyyətlərin əlavə edilməsi klasterlərin daha dəqiq və fərqləndirilə bilən şəkildə qurulmasına imkan verir. RFMI modelində klasterlərarası sərhədlərin daha aydın olması, istifadəçi davranışlarının dərin təhlili üçün üstünlük yaradır. Bank sektorunda bu yanaşma sayəsində fərqli müştəri qruplarının məsələn riskli, sədaqətli və ya potensial dəyərli istifadəçilərin daha düzgün identifikasiyasını təmin edir. İstifadəçi imzalarından çıxarılan vizual xüsusiyyətlər bank əməliyyatlarının təhlükəsizliyində və fırıldaqçılıq hallarının aşkarlanmasında əlavə təbəqə kimi xidmət edə bilər. Bundan əlavə, bu yanaşma hər bir bank istifadəçisi üçün fərdiləşdirilmiş xidmətlərin göstərilməsinə, müştəri məmnuniyyətinin artırılmasına və risklərin daha düzgün idarə olunmasına əhəmiyyətli dərəcədə təsir edə bilər.

### Ədəbiyyat

1. Kotler, P., & Keller, K. L. (2016). *Marketing Management* (15th ed.). Pearson Education.
2. Hughes, A. M. (1994). *Strategic Database Marketing*. Probus Publishing.
3. R. Aggarwal et al. (2021). Deep Learning-Based Customer Segmentation and Profiling in Banking. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 13340–13352.
4. Jain, A. K. (2010). *Data clustering: 50 years beyond K-means*. Pattern Recognition Letters,



- 31(8), 651–666.
5. MacQueen, J. (1967). *Some methods for classification and analysis of multivariate observations*. In Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, 1, 281–297.
  6. Rousseeuw, P. J. (1987). *Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis*. Journal of Computational and Applied Mathematics, 20, 53–65.
  7. Davies, D. L., & Bouldin, D. W. (1979). *A cluster separation measure*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2, 224–227.
  8. Calinski, T., & Harabasz, J. (1974). *A dendrite method for cluster analysis*. Communications in Statistics, 3(1), 1–27.

### **BEHAVIORAL AND SIGNATURE-BASED CUSTOMER CLUSTERING AND ANOMALY DETECTION USING THE RFMI MODEL IN THE BANKING SECTOR**

Rahimov M.E.

**Abstract.** This study explores the impact of incorporating visual signature features into the traditional RFM (Recency, Frequency, Monetary) model to achieve more precise customer segmentation in the banking sector. While the standard RFM approach is effective in summarizing purchasing behavior, it often struggles to delineate clear boundaries between customer clusters. To address this limitation, a new indicator was derived based on four key features extracted from each user's visual signature—average pixel density (AvgPixelDensity), number of contours (AvgNumContours), contour area (AvgBoundingArea), and stroke width (AvgStrokeWidth)—and integrated into the original RFM model. The resulting extended RFMI model demonstrated superior clustering performance, as evidenced by improvements in the Silhouette Score (from 0.3963 to 0.5849), Calinski-Harabasz Index (from 808.16 to 3404.71), and Davies-Bouldin Index (decreasing from 0.7654 to 0.5139). Furthermore, anomaly detection using Z-score revealed higher intra-cluster and inter-cluster visual distinctions among observations identified by the RFMI model. These findings confirm that augmenting RFM with visual behavioral indicators significantly enhances the segmentation quality and provides a stronger foundation for personalized banking services, risk identification, and the planning of targeted campaigns.

**Keywords:** customer segmentation, RFM model, RFMI model, K-Means clustering, Silhouette Score, Calinski-Harabasz Index, Davies-Bouldin Index, Z-score

## TƏHLÜKƏLİ ŞƏXSLƏRİN TANINMASINDA SÜNİ İNTELLEKTİN ROLU



**Qarayeva S.A.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
samira.qarayeva.02@mail.ru



**Nağiyev N.T.**

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan  
nnaghiyev@naa.edu.az

**Xülasə.** Mülki aviasiyada təhlükəsizliyin təmin edilməsi məqsədilə təhlükəli şəxslərin tanınması məsələsi müasir dövrdə əhəmiyyətli bir problem olaraq qalmaqdadır. Bu kontekstdə, süni intellekt (Sİ) sistemləri, böyük məlumat analizi və avtomatlaşdırılmış tanıma texnologiyaları vasitəsilə mülki aviasiya mühitində risklərin minimallaşdırılmasında mühüm rol oynayır. Məqalədə Sİ-nin müxtəlif tətbiq sahələri, o cümlədən biometrik sistemlər, davranış analizi və təhlükəsizlik kameralarının integrasiyası üzərində dayanılır. Sİ-nin istifadəsi, insan faktorunun zəif tərəflərini aradan qaldırmaqla, operativ və effektiv tanıma metodlarını təqdim edir.

**Açar sözlər:** süni intellekt, təhlükəli şəxslərin tanınması, biometrik texnologiyalar, davranış analizi, mülki aviasiya, təhlükəsizlik sistemləri

**Giriş.** Son illərdə global təhlükəsizlik çağırışlarının artması fonunda mülki aviasiya sahəsində süni intellektin (Sİ) tətbiqi strateji əhəmiyyət kəsb edən məsələlərdən birinə çevrilmişdir. Sərnişin axınının sürətlə artması, hava nəqliyyatının beynəlxalq xarakter daşması və transsərhəd cinayətkarlıq risklərinin yüksəlməsi, ənənəvi təhlükəsizlik mexanizmlərinin effektivliyini sual altına qoymuşdur. Bu kontekstdə süni intellekt texnologiyaları, təhlükəli şəxslərin tanınması və monitorinq sahəsində inqilabi dəyişikliklərə yol açaraq, mövcud sistemlərin imkanlarını əhəmiyyətli dərəcədə gücləndirmişdir.

Sİ texnologiyaları, yüksək dəqiqliklə risk daşıyan fərdləri müəyyənləşdirmək üçün biometrik identifikasiya, davranış analizi, böyük verilənlərin (Big Data) təhlili və dərin öyrənmə metodlarını özündə birləşdirir. Biometrik sistemlər — üz, iris və barmaq izi tanıma texnologiyaları — identifikasiya prosesini sürətləndirərək, insan faktorundan irəli gələn səhvləri minimuma endirir. Paralel olaraq, davranış analizi alqoritmləri qeyri-adi hərəkət nümunələrini aşkarlayaraq potensial təhlükələrin erkən mərhələdə müəyyən olunmasına şərait yaradır. Bu isə mülki aviasiyanın ən həssas sahələrindən biri olan sərnişin təhlükəsizliyində yeni yanaşmaların formalaşmasına gətirib çıxarır.

Təhlükəli şəxslərin tanınması üsulları. Təhlükəli şəxslərin müəyyənləşdirilməsi uzun müddət müxtəlif ənənəvi metodlarla həyata keçirilmişdir. Ənənəvi yanaşmalara, əsasən, təhlükəsizlik işçilərinin müşahidə qabiliyyəti, analitik düşünmə bacarığı və insana əsaslanan müayinə metodları daxil idi. Bu metodlarda əsas diqqət sərnişinlərin xarici görünüşlərinə, hərəkətlərinə və təsadüfi sorğular vasitəsilə davranışlarının analizinə yönəldilirdi [1]. Lakin insan faktoru ilə bağlı zəif tərəflər – emosional qərarlar, yorğunluq, diqqət dağınıqlığı və təcrübə çatışmazlığı – bəzən səhv

qərarların qəbuluna səbəb olurdu. Süni intellektin tətbiqi isə bu çatışmazlıqları aradan qaldıraraq, obyektiv və sistemli yanaşmanı mümkün edir. Böyük həcmli verilənlərin təhlili sayəsində tanınmış şəxslərin əvvəlki fəaliyyətləri, sosial şəbəkələrdəki davranışları, səyahət marşrutları və maliyyə əməliyyatları eyni platformada birləşdirilərək risk proqnozlaşdırılması aparılır. Bu yanaşma, ənənəvi metodlarla müqayisədə həm sürət, həm də dəqiqlik baxımından üstünlük təşkil edir.

Bu yanaşmaların əksinə olaraq, süni intellektin tətbiqi daha sistemli və obyektiv nəticələr təqdim edir. Sİ sistemləri, böyük həcmli məlumatların təhlili və öyrənmə üsulları vasitəsilə həm tanınmış şəxslərin əvvəlki davranışlarını, həm də potensial risk daşıyan fərdlərin fəaliyyət tarixçəsini araşdırır. Sosial şəbəkələrdəki davranış nümunələri, səyahət marşrutları, maliyyə əməliyyatları və digər əlaqəli göstəricilər də nəzərə alınaraq, mümkün risklər proqnozlaşdırıla bilər. Bu isə insan faktoru ilə müqayisədə daha obyektiv və dəqiq nəticələr ortaya qoyur.

Mülki aviasiyada Sİ-nin geniş imkanları. Süni intellektin tətbiqi yalnız təhlükəli şəxslərin tanınması ilə məhdudlaşmır, eyni zamanda təhlükəsizlik sistemlərinin bütün komponentlərinin integrasiyasını təmin edir. Məsələn, hava limanlarında yerləşdirilən yüksək qətnaməli təhlükəsizlik kameraları Sİ ilə təchiz olunaraq, real vaxt rejimində səfərlərin hərəkətlərini izləyə bilər. Bu kameralar adi müşahidə funksiyasından kənara çıxaraq, avtomatik olaraq anomaliyaları müəyyən edir və təhlükəsizlik əməkdaşlarını dərhal xəbərdar edir. Bunun nəticəsində hadisələrə reaksiya vaxtı əhəmiyyətli dərəcədə azalır ki, bu da mülki aviasiya təhlükəsizliyinin yüksəldilməsində həlledici amildir.

Daha inkişaf etmiş Sİ sistemləri dərin öyrənmə metodlarından istifadə edir. Çoxqatlı neyron şəbəkələri vasitəsilə böyük həcmli məlumatların təhlili, insan davranışlarının daha incə nüanslarını başa düşməyə imkan yaradır. Bu texnologiya, səfərlərin davranışında kiçik, amma əhəmiyyətli fərqləri belə aşkar edərək, potensial təhlükələri vaxtında müəyyənləşdirir. Beləliklə, Sİ yalnız müşahidə vasitəsi kimi deyil, həm də təhlükəsizlik əməkdaşlarının qərarvermə prosesində mühüm dəstəkçi alət rolunu oynayır [2,3].

Biometrik sistemlərin rolu. Müasir biometrik sistemlər sadəcə identifikasiya üçün deyil, həm də yoxlamaların etibarlılığını artırmaq üçün geniş tətbiq olunur. Üz tanıma, iris skanərləri və barmaq izi texnologiyaları, səfərlərin sürətli və dəqiq yoxlanışını təmin edir. Bu sistemlərin tətbiqi həm səfərlər üçün rahatlıq yaradır, həm də təhlükəsizlik əməkdaşlarına mümkün riskləri daha obyektiv qiymətləndirmək imkanı verir. Ənənəvi pasport yoxlamalarından fərqli olaraq, biometrik sistemlər insan səhvlərinin təsirini minimuma endirir və yüksək dəqiqliklə nəticələr təqdim edir. Bu sistemlərin tətbiqi, səfərlərin daha komfortlu və təhlükəsiz səyahət mühitində hərəkət etməsinə şərait yaradır, eyni zamanda, təhlükəsizlik əməkdaşlarının iş yükünü azaldır və resurslardan daha rəşional istifadəni mümkün edir.

Məlumatların toplanması və analizi. Süni intellektin əsas üstünlüklərindən biri böyük məlumatların toplanması və emal edilməsidir. Sİ sistemləri səfərlərin hava limanındakı hərəkətlərini izləyərək onların fərdi profillərini yaradır. Bu profillər səyahət tarixçəsi, əvvəlki risk davranışları və digər göstəricilərlə birləşdirilərək yüksək dəqiqlikli proqnozlar verir. Bu, təhlükəsizlik işçilərinə səfərlər haqqında daha geniş informasiya əldə etmək və ehtiyac olduqda qabaqlayıcı tədbirlər görmək imkanı yaradır. Mülki aviasiya təhlükəsizliyində süni intellektin ən mühüm üstünlüklərindən biri genişhəcmli məlumatların emalı və təhlilidir. Səfərlərin hava limanındakı hərəkət trayektoriyaları, əvvəlki səyahət tarixçəsi, potensial risk davranışları kimi göstəricilər vahid profil altında birləşdirilərək yüksək dəqiqlikli proqnozlar hazırlanır.

Beləliklə, Sİ yalnız müşahidə və tanıma funksiyalarını yerinə yetirmir, həm də qabaqlayıcı tədbirlər üçün əsaslı məlumat bazası yaradır. Bu, risklərin erkən mərhələdə aşkarlanmasına və hadisələrin qarşısının alınmasına mühüm töhfə verir [4].

Çətinliklər və etik məsələlər. Sİ sistemlərinin tətbiqi ilə bağlı bir sıra çətinliklər də mövcuddur. İlk növbədə, şəxsi məlumatların gizliliyi, insan hüquqları və etik məsələlər ciddi

müzakirə mövzudur. Məsələn, biometrik məlumatların toplanması və saxlanması, bu məlumatlardan sui-istifadə ehtimalı ilə bağlı narahatlıqlar yaradır. Digər tərəfdən, Sİ sistemlərinin dəqiqliyi müxtəlif vəziyyətlərdə dəyişə bilər və sistemlərin etibarlılığını qorumaq üçün onların mütəmadi yenilənməsi və təkmilləşdirilməsi tələb olunur. Texnologiyanın inkişafı ilə yanaşı, cinayətkar fəaliyyətlərin də yeni üsulları meydana çıxa bilər ki, bu da təhlükəsizlik sistemlərinin daim modernləşdirilməsini zəruri edir [5].

**Gələcək perspektivlər.** Hazırda mülki aviasiyada tətbiq olunan Sİ sistemləri hələ tamamilə mükəmməl deyil. Bununla belə, davamlı inkişaf prosesi nəticəsində bu texnologiyalar daha da güclənəcək və yeni metodlarla zənginləşəcəkdir. Süni intellektin integrasiyası mülki aviasiyanın təhlükəsizliyinin artırılması üçün strateji əhəmiyyət daşıyır. Bu sahədə aparılan elmi tədqiqatlar, Sİ-nin daha geniş tətbiqinə yol açacaq, həmçinin etik, hüquqi və texnoloji problemlərin həlli üçün yeni strategiyalar təklif edəcəkdir.

**Analitik alətlərin rolu.** Sİ-nin effektivliyini artırmaq üçün yalnız məlumatların toplanması kifayət etmir, eyni zamanda onların düzgün analiz edilməsinə ehtiyac duyulur. Analitik alətlər, toplanmış məlumatları strukturlaşdıraraq, təhlükəsizlik əməkdaşlarına real vəziyyətin daha aydın mənzərəsini təqdim edir. Bu alətlər nəticələrin dəqiqliyini artırmaqla yanaşı, Sİ sistemlərinin tətbiqinin ümumi səmərəliliyini də yüksəldir [6,7].

**Nəticə.** Süni intellekt vasitəsilə təhlükəli şəxslərin tanınması mülki aviasiya sektorunda təhlükəsizliyin artırılması üçün ən müasir və effektiv yanaşmalardan biridir. Bu texnologiya, yüksək dəqiqlik və sürətlə təhlükələri aşkarlamaqla yanaşı, müvafiq orqanların qərar qəbul etmə prosesini optimallaşdırır. Lakin bununla bərabər, etik və məxfilik məsələləri də mütləq nəzərə alınmalıdır. Yalnız balanslaşdırılmış və məsuliyyətli tətbiqlər sayəsində Sİ sistemləri mülki aviasiyanın gələcək təhlükəsizlik konsepsiyasında əsas rol oynaya biləcəkdir.

**Təkliflər.** Aparılan tədqiqatlar göstərdi ki, mülki aviasiyada potensial təhlükəli şəxslər (PTŞ) vaxtında neytrallaşdırmaq üçün yalnız klassik təhlükəsizlik tədbirləri kifayət etmir. Yeni nəsil yanaşmalar bu boşluqları aradan qaldırmaq üçün effektiv mexanizmlər təqdim edir.

1. Təhsil və məlumatlandırma: Əlaqəli mütəxəssislərin süni intellekt və biometrik sistemlər üzrə təhsili artırılmalıdır. Bunun üçün müvafiq təlim proqramları və seminarlar təşkil edilməlidir.
2. Məlumat mübadiləsi: Beynəlxalq mülki aviasiya orqanları arasında məlumat mübadiləsi və əməkdaşlıq inkişaf etdirilməlidir. Bu, müvafiq məlumatların sürətli paylaşımını təmin edəcək.
3. Etika və məxfilik: Sİ sistemlərinin tətbiqində etik və məxfilik məsələləri diqqətlə nəzərdən keçirilməlidir ki, insan hüquqları qorunsun. Bu kontekstdə, hüquqi tənzimləmələr və protokollar hazırlanmalıdır.
4. Texnologiyaların integrasiyası: Fərqli təhlükəsizlik sistemləri arasında integrasiyanın təşviqi, sistemlərin daha səmərəli işləməsini təmin edəcək.
5. Davamlı inkişaf: Süni intellektin inkişafını izləmək və yeni texnologiyaların mülki aviasiyaya integrasiyası üçün davamlı tədqiqatlar aparılmalıdır.

### Ədəbiyyat

1. Cohen, J., & Frosch, J. (2020). "Artificial Intelligence in Aviation Security: Current Applications and Future Perspectives." *Journal of Air Transport Management*
2. Bertolini, M., & Grassi, R. (2019). "Biometric Technologies in Aviation Security: An Overview." *Aerospace*
3. Friedman, B., & Nissenbaum, H. (2018). "Bias in Computer Systems." *ACM Transactions on Information Systems*.

4. Patel, V. M., & Chellappa, R. (2020). "Deep Learning for Face Recognition: A Review." IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.
5. Zhang, Y., & Hu, Y. (2021). "Artificial Intelligence and Machine Learning in Cybersecurity: A Review." Future Generation Computer Systems.
6. Ruan, Y., & Zhang, Y. (2022). "Surveillance and Monitoring of Aviation Security: Innovations and Challenges." Aviation Security Journal
7. Müller, M. (2019). "Ethics of Artificial Intelligence in Aviation: Implications for Security and Privacy." Journal of Aviation Technology and Engineering

## IDENTIFICATION OF DANGEROUS INDIVIDUALS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Garayeva S.A, Nagiyev N.T.

**Abstract.** *The issue of identifying dangerous individuals for ensuring safety in civil aviation remains a significant problem in modern times. In this context, artificial intelligence (AI) systems play a crucial role in minimizing risks within the civil aviation environment through big data analysis and automated recognition technologies. This article focuses on various applications of AI, including biometric systems, behavioral analysis, and the integration of security cameras. The use of AI presents operational and effective identification methods by addressing the weaknesses of the human factor.*

**Keywords:** *artificial intelligence, threat identification, biometric technologies, behavioral analysis, civil aviation, security systems*



## SÜNİ İNTELLEKT ƏSASLI MƏSAFƏDƏN SAĞLAMLIQ MONITORINQI SİSTEMLƏRİNİN İQTİSADI SƏMƏRƏLİLİYİ



**Piriye İ.N.**

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı, Azərbaycan  
izzet.piriye@asoiu.edu.az



**Xidirov A.Ş.**

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı, Azərbaycan  
xidirov52@gmail.com

**Xülasə.** Xroniki qeyri-infeksion xəstəliklərin (ürək-damar xəstəlikləri, şəkərli diabet, xərçəng və tənəffüs yollarının xroniki xəstəlikləri) artan yayılması müasir səhiyyə sistemlərinə ciddi iqtisadi və sosial təsirlər göstərir. Bu vəziyyət, tibbi xidmətlərin keyfiyyətinin artırılması və resurslardan daha səmərəli istifadə olunması üçün innovativ texnologiyaların tətbiqini zəruri edir. Bu məqalədə süni intellekt əsaslı məsafədən sağlamlıq monitorinqi sistemlərinin iqtisadi səmərəliliyi qiymətləndirilmişdir.

Tədqiqat çərçivəsində, Azərbaycanda xroniki xəstəliklərdən ölüm göstəriciləri üzrə statistik məlumatlar təhlil olunmuş, eyni zamanda ABŞ Qida və Dərman Administrasiyası (FDA) tərəfindən təsdiqlənmiş süni intellekt əsaslı cihazların istifadəsi, qiyməti və funksional imkanları araşdırılmışdır.

Analiz nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, ilkin qurulma və texniki xərclər yüksək olsa da, bu sistemlər uzunmüddətli dövrdə səhiyyə xərclərinin optimallaşdırılmasına və tibbi xidmətin keyfiyyətinin yüksəldilməsinə müsbət təsir göstərir. Süni intellekt sistemləri əməliyyat xərclərini azaldır, tibbi personal üzərindəki yükü yüngülləşdirir, hospitalizasiyanı azaldır və erkən diaqnostika imkanı yaradır. Bu da, onların səhiyyədə geniş tətbiqini iqtisadi cəhətdən əsaslandırır.

**Açar sözlər:** süni intellekt, məsafədən sağlamlıq monitorinqi, iqtisadi səmərəlilik, resursların səmərəli istifadəsi, sağlamlıq texnologiyaları

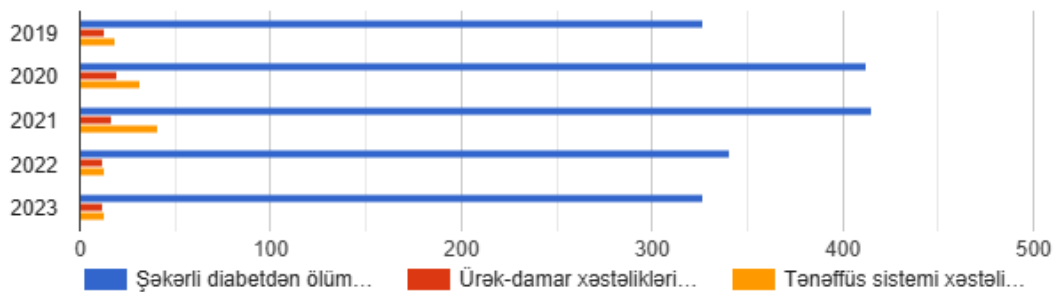
**Giriş.** Ümumdünya Səhiyyə Təşkilatının (ÜST) 2024-cü ildə paylaşdığı statistikaya görə, qlobal ölüm hallarının təxminən 75%-i xroniki qeyri-infeksion xəstəliklərin – ürək-damar xəstəlikləri, xərçəng, şəkərli diabet və tənəffüs yollarının xroniki xəstəlikləri – payına düşür [1]. Bu xəstəliklərin yayılması yalnız səhiyyə sistemlərinə deyil, eyni zamanda ölkələrin iqtisadiyyatına da böyük təsir göstərir.

Tibbi xidmətlərin keyfiyyətinin və effektivliyinin artırılması, həmçinin mövcud resurslardan daha səmərəli istifadə olunması məqsədilə səhiyyə sahəsində texnoloji yeniliklərə əsaslanan müasir yanaşmalara ciddi ehtiyac yaranmışdır. Bu kontekstdə süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının səhiyyə sistemində inteqrasiyası tibbi diaqnostika, müalicə və monitorinq proseslərində mühüm transformasiyalara səbəb olmuşdur [2].

Dünyada və ölkəmizdə səhiyyə xərclərinin optimallaşdırılması, xidmət keyfiyyətinin artırılması və resursların daha səmərəli istifadə olunması aktual olan məsələlərdən biridir [3]. Süni intellektə əsaslanan məsafədən monitorinq sistemləri, ənənəvi yanaşmalara alternativ olaraq daha çevik, daha qənaətcil və real vaxtda qərarvermə imkanları təmin edir [2].

Mövcud ədəbiyyatlarda Sİ əsaslı məsafədən sağlamlıq sistemlərin texniki funksionallığı və tibbi effektivliyi geniş şəkildə araşdırılsa da, onların iqtisadi faydalarının – xüsusilə səhiyyə xərclərinə qənaət, resursların optimallaşdırılması və investisiya gəliri baxımından – qiymətləndirilməsi hələ də yetəri qədər təhlil olunmamışdır. Məsafədən monitoring texnologiyalarının, xüsusilə geyilə bilən cihazlar və mobil tətbiqlərlə birlikdə, xroniki xəstəliklərin idarə olunmasında və ev şəraitində tibbi nəzarətin həyata keçirilməsində müsbət nəticələr versə də, bəzi tədqiqatlarda iqtisadi səmərəliliklə bağlı narahatlıqlar mövcuddur. Bu texnologiyaların ilkin qurulma və texniki dəstək xərcləri, habelə hüquqi və etik məsələlər bəzi ölkələrdə onların geniş tətbiqinə mane olur [9].

**Metodlar.** Xroniki xəstəliklərin artan yayılması səhiyyə sistemlərinə ciddi yük yaradır və bu xəstəliklərin statistik göstəricilərinin təhlili mövzunun aktuallığını bir daha vurğulayır. Bu xəstəliklərin artımını və təsirini vizual şəkildə göstərmək məqsədilə Azərbaycan Respublikası Dövlət Statistika Komitəsinin rəsmi məlumatları əsasında hazırlanmış qrafiklərdən istifadə edilmişdir. Şəkil 1-də ürək-damar xəstəlikləri, şəkərli diabet və tənəffüs yollarının xroniki xəstəliklərindən ölüm səviyyəsinin dinamikası əks olunmuşdur [4].



**Şəkil 1.** Ürək-damar xəstəliyi, şəkərli diabet və tənəffüs yollarının xroniki xəstəliklərindən ölüm səviyyəsi [4]

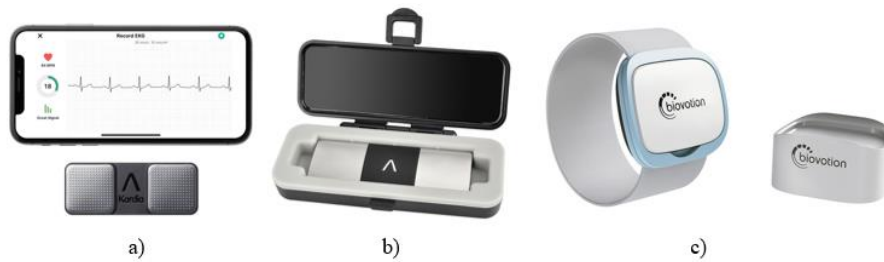
Hal-hazırda süni intellektə əsaslanan məsafədən sağlamlıq monitoringi sistemləri bu sahədə ən müasir texnoloji həllər kimi önə çıxır. Bir çox cihaz və proqram təminatları ABŞ-ın Qida və Dərman Administrasiyası (FDA) tərəfindən təsdiqlənmiş, kliniki tətbiqə uyğunluğu təsdiq olunmuşdur. Cədvəl 1-də süni intellekt əsaslı məsafədən sağlamlıq monitoringi sahəsində geniş istifadə olunan, FDA tərəfindən təsdiqlənmiş bəzi cihazların siyahısı təqdim olunmuşdur. Bu cihazlar müxtəlif xroniki xəstəliklərin idarə olunmasında istifadə edilir və onların effektivliyi klinik tədqiqatlarla təsdiqlənmişdir.

Cədvəl 1.

FDA tərəfindən təsdiqlənmiş bəzi  
süni intellekt əsaslı məsafədən sağlamlıq monitoringi cihazları

| Cihazın adı                 | İstifadə sahəsi                 | Qiyməti         | Qısa təsvir                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AliveCor<br>KardiaMobile    | Ürək ritminin<br>monitorinqi    | 89 €            | Atrial fibrilasiya (AFib), normal sinus ritmi, bradikardiya, taxikardiya [5]                                                                                                                                               |
| AliveCor<br>KardiaMobile 6L | Ürək ritminin<br>monitorinqi    | 149 €           | Yuxarıdakı bütün ritm pozuntuları, QTc intervalının ölçülməsi, ürəyin frontal müstəvidə elektrik oxları üzrə fəaliyyətinin təhlili (I, II, III, aVR, aVL, aVF), bəzi iskemik dəyişikliklər (məs., ST dəyişiklikləri) [6,7] |
| Biofourmis<br>Biovitals™    | Fizioloji monitoring<br>sistemi | Abunə<br>əsaslı | Ürək ritmi, tənəffüs sayı, fiziki aktivlik [8]                                                                                                                                                                             |

Şəkil 2-də süni intellekt əsaslı məsafədən sağlamlıq monitorinqi cihazları göstərilmişdir. Bu cihazlar müxtəlif fizioloji göstəricilərin (ürək ritmi, tənəffüs göstəriciləri və s.) davamlı şəkildə izlənilməsinə təmin edir.



**Şəkil 2.** Süni intellekt əsaslı məsafədən sağlamlıq monitorinqi cihazları; a) AliveCor KardiaMobile; b) AliveCor KardiaMobile 6L; c) Biofourmis Biovitals™

Süni intellekt əsaslı məsafədən sağlamlıq monitorinqi sistemlərinin iqtisadi səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi üçün Şəkil 3-də təqdim olunan göstəricilər əsas götürülmüşdür [10-12].



**Şəkil 3.** İqtisadi səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi göstəriciləri

Şəkil 3-də göstərilən bu iqtisadi göstəricilər, süni intellekt əsaslı məsafədən sağlamlıq monitorinqi sistemlərinin səhiyyə xərclərinə olan təsirini dəyərləndirmək üçün əsas analitik çərçivəni formalaşdırır və bu istiqamətdə əldə edilən nəticələr növbəti bölmədə geniş şəkildə müzakirə olunur.

**Nəticə və müzakirələr.** İlkin qurğu və infrastruktur xərcləri. Süni intellekt əsaslı sistemlərin tətbiqi ilkin mərhələdə texniki qurğuların (sensorlar, serverlər, program təminatı) alınması və infrastrukturun qurulması ilə bağlı yüksək maliyyə tələb edir. Lakin bu xərclər, sistemlərin davamlı işləkliyi və çoxsaylı xəstəyə eyni vaxtda xidmət göstərmə potensialı ilə zamanla kompensasiya olunur. İri xəstəxana şəbəkələri və milli səhiyyə sistemlərində investisiya qaydışı (ROI) bu sahədə əhəmiyyətli dərəcədə müsbət nəticə verir [13,14].

Əməliyyat və xidmət xərcləri. Ənənəvi tibbi xidmətlərlə müqayisədə, süni intellektlə avtomatlaşdırılmış sistemlər xəstə məlumatlarını uzaqdan təhlil etməyə imkan verir və bu da kliniki prosedurların bir hissəsini əvəz edərək əməliyyat və xidmət xərclərini azaldır. Xəstələrin mütəmadi olaraq klinikaya gəlmək ehtiyacının azalması bu qənaətin əsas səbəblərindəndir [14].

Tibbi personal xərclərində azalma. Süni intellekt sistemləri pasiyent məlumatlarını avtomatik toplayaraq ilkin analizləri həyata keçirdiyindən, tibbi personalın üzərindəki yük əhəmiyyətli dərəcədə azalır. Bu da maaş fondunda və işçi qüvvəsinin daha səmərəli bölgüsündə qənaətə səbəb

olur. Eyni zamanda, həkimlər yalnız ciddi riskli hallara fokuslana bildikləri üçün xidmət keyfiyyəti artır [14,15].

Stasionar müalicə ehtiyacının azalması. Real vaxtda monitoring və erkən xəbərdarlıq sistemləri vasitəsilə xəstəliklərin ağırlaşmadan aşkarlanması nəticəsində xəstəxanaya yatış halları azalır. Bu isə səhiyyə sisteminin maliyyə yükünü yüngülləşdirir və əlavə xidmət xərclərinin qarşısını alır [15].

Erkən diaqnostika ilə uzunmüddətli qənaət. Süni intellekt əsaslı sistemlərin ən mühüm üstünlüklərindən biri erkən mərhələdə diaqnostikanın təmin olunmasıdır. Bu, xüsusilə xroniki xəstəliklərdə (məsələn, şəkərli diabet, ürək-damar patologiyaları) uzunmüddətli ağırlaşmaların qarşısını almaqla həm pasiyentin həyat keyfiyyətini yüksəldir, həm də ümumi müalicə xərclərini azaldır [16].

**Təkliflər.** Süni intellekt əsaslı sağlamlıq texnologiyalarının tətbiqi istiqamətində Azərbaycanda və bir çox ölkələrdə hələ də vahid milli standartlar, tənzimləyici çərçivə və strateji yol xəritəsi mövcud deyil. Bu isə texnologiyaların genişmiqyaslı və etibarlı şəkildə tətbiqinə əngəl yaradır. Bu səbəbdən rəqəmsal səhiyyə sahəsində milli strategiya hazırlanmalı, süni intellektə əsaslanan məsafədən sağlamlıq monitoringi sistemləri həmin strategiyada prioritet istiqamət kimi müəyyənləşdirilməlidir. Strategiya çərçivəsində texnoloji infrastruktur, hüquqi və etik tələblər, məlumat təhlükəsizliyi, klinik integrasiya mexanizmləri və iqtisadi stimullaşdırma vasitələri öz əksini tapmalıdır. Bu yanaşma texnologiyanın təkə texniki deyil, sosial və iqtisadi cəhətdən də dayanıqlı şəkildə integrasiyasını təmin edir.

Yeni texnologiyaların effektiv tətbiqi üçün təkə tibbi heyətin deyil, istifadəçilərin – yəni pasiyentlərin və onların ailə üzvlərinin də bu sistemlərdən düzgün istifadə bacarıqlarına yiyələnməsi vacibdir. Bu məqsədlə həkimlər, tibb bacıları və texniki heyət üçün müntəzəm təlim və sertifikatlaşdırma proqramları təşkil edilməli, eyni zamanda istifadəçilərə yönəlik sadə və ölçətan maarifləndirmə modulları (videodərsliklər, mobil tətbiqlərdə təlim funksiyaları və s.) hazırlanmalıdır.

### Ədəbiyyat

1. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>
2. <https://www.foreseemed.com/artificial-intelligence-in-healthcare>
3. Yaqubov B.K.(2017). Səhiyyə xərclərinin səmərəliliyinin artırılması məqsədilə büdcə nəzarəti sisteminin təkmilləşdirilməsi. Azərbaycan Dövlət İqtisad Universiteti, Dissertasiya işi.
4. Azərbaycan Respublikası Dövlət Statistika Komitəsi, <https://sdg.azstat.gov.az/az/indicators/937/urek-damar-xesteliyi-xercheng-sekerli-diabet-ve-ya-teneffus-yollarinin-xroniki-xesteliklerinden-olum>
5. AliveCor Inc. (2012). KardiaMobile ECG device. Retrieved from <https://www.alivecor.com>
6. AliveCor Inc. (2019). FDA grants first-ever clearance for six-lead personal ECG device. Retrieved from [https://alivecor.com/press/press\\_release/fda-grants-first-ever-clearance-for-six-lead-personal-ecg-device](https://alivecor.com/press/press_release/fda-grants-first-ever-clearance-for-six-lead-personal-ecg-device)
7. AliveCor Inc. (2021). FDA clears personal ECG device for measurement of QTc interval. Retrieved from <https://alivecor.com/press>
8. Biofourmis. (2019). Biofourmis Biovitals™ Analytics Engine receives FDA clearance for ambulatory physiological monitoring. <https://biofourmis.com/news-insights/biofourmis-biovitals-analytics-engine-receives-fda-clearance>
9. Orava, T., et al. (2022). Economic Evaluations of Remote Patient Monitoring for Chronic Disease: A Systematic Review. Value in Health, 25(6), 897–913. <https://doi.org/10.1016/j.jval.2021.12.001>

10. Le Goff-Pronost, M., & Bongiovanni-Delarozière, I. (2023). Economic evaluation of remote patient monitoring and organizational analysis according to patient involvement: A scoping review. *International Journal of Technology Assessment in Health Care*, 39(1), e59. <https://doi.org/10.1017/S0266462323002581>
11. Zhang, Y., Peña, M. T., Fletcher, L. M., Lal, L., Swint, J. M., & Reneker, J. C. (2023). Economic evaluation and costs of remote patient monitoring for cardiovascular disease in the United States: A systematic review. *International Journal of Technology Assessment in Health Care*. <https://doi.org/10.1017/S0266462323000156>
12. Tan, S. Y., et al. (2024). A systematic review of the impacts of remote patient monitoring (RPM) interventions on safety, adherence, quality-of-life and cost-related outcomes. *Digital Medicine*, 7, Article 192. <https://doi.org/10.1038/s41746-024-00844-2>
13. Zhang, D. S., Millet, L., Bellows, B. K., Lee, S., & Mann, D. (2025). Program cost and return on investment of a remote patient monitoring program for hypertension management. *medRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2025.01.29.25321334>
14. The Economic Impact of AI-Driven Remote Patient Monitoring: A Business Intelligence Perspective on Healthcare Cost Optimization. (2025). *Journal of Global Education and Research*, 6(5), 39–67. <https://doi.org/10.55640/business/volume06issue05-03>
15. [https://www.mahalo.health/insights/artificial-intelligence-in-remote-patient-monitoring-trends-challenges?utm\\_mpdid=\\$device:1936aeae83514-064be7c2f-3f445b69-49a10-1936aeae83615](https://www.mahalo.health/insights/artificial-intelligence-in-remote-patient-monitoring-trends-challenges?utm_mpdid=$device:1936aeae83514-064be7c2f-3f445b69-49a10-1936aeae83615)
16. <https://biotech-spain.com/en/articles/ai-in-healthcare-a-cost-saving-revolution/>

## ECONOMIC EFFICIENCY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED REMOTE HEALTH MONITORING SYSTEMS

Piriyev I.N., Khidirov A.S.

**Abstract.** *The increasing prevalence of chronic non-communicable diseases-such as cardiovascular diseases, diabetes, cancer, and chronic respiratory illnesses-poses significant economic and social challenges to modern healthcare systems. This situation necessitates the integration of innovative technologies to improve service quality and optimize the use of healthcare resources. This paper evaluates the economic efficiency of artificial intelligence (AI)-based remote health monitoring systems.*

*The study analyzes mortality trends from chronic diseases in Azerbaijan using official statistical data. It also reviews AI-powered monitoring devices approved by the U.S. Food and Drug Administration (FDA), including their use cases, pricing, and functional capabilities.*

*The findings suggest that although the initial setup and infrastructure costs of these systems may be high, they lead to significant long-term savings by optimizing healthcare expenditures and improving service delivery. AI-based systems reduce operational costs, ease the workload of healthcare professionals, decrease hospitalization rates, and enable early diagnosis. These benefits justify the broader implementation of such technologies within healthcare systems from an economic perspective.*

**Keywords:** *artificial intelligence, remote health monitoring, economic efficiency, efficient use of resources, health technologies*



## THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF AI-DRIVEN INNOVATION: EVIDENCE FROM THE UNITED STATES



**Mukhtarov S.Z.**

Korea University, Seoul, South Korea  
Vistula University, Warsaw, Poland  
Khazar University, Baku, Azerbaijan  
s.mukhtarov@vistula.edu.pl



**Kartal M.T.**

Khazar University, Baku, Azerbaijan  
European University of Lefke, Lefke, Northern Cyprus, Mersin, Türkiye  
mustafatevfikkartal@gmail.com

**Abstract.** This research examines the impact of Artificial Intelligence (AI)-related patents, income, trade openness, and energy intensity on carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in the United States. To examine this relationship, Canonical Cointegration Regression (CCR), Dynamic Ordinary Least Squares (DOLS), and Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS) methods are employed. The results from the methods applied confirm a positive and statistically significant impact of AI-related patents, income, trade openness, and energy intensity on CO<sub>2</sub> emissions. Furthermore, the interactive term, which represents the joint impact of renewable energy generation and AI-related patents, has a negative and statistically significant impact on CO<sub>2</sub> emissions. This key outcome indicates that renewable energy generation (REG) effectively attenuates the sensitivity of Azerbaijan's CO<sub>2</sub> emissions to variations in global oil prices. Consequently, policy recommendations derived from this study emphasize that in order for AI to reduce emissions, it is necessary to reduce energy intensity in industry and transport through AI, integrate it with renewable energy, promote mainly energy-efficient projects, and strengthen the trade of AI-based green technologies.

**Keywords:** Azerbaijan, CO<sub>2</sub> emissions, economic growth, international oil prices, renewable energy generation, sustainable development

**Introduction.** In recent years, the negative impacts of climate and environment-related issues have increased. Accordingly, the interest of all countries and communities in environmental issues has been developing. In this context, the related parties have been considering a set of factors including both economic and non-economic to empirically understand the causes of negative progress over the years [1].

According to the current, both economic growth and energy intensity have taken place among the causes of environmental changes [2,3]. Also, some literature has considered the role of trade openness [4]. Although those factors have been used in the literature, contemporary literature has begun to consider the role of AI recently due to its dominant role that has come to the fore [5,6]. However, the current use of AI algorithms is mainly related to technological issues, where it causes high energy utilization as harmful to the environment. On the other hand, AI-related patents have been devoted highly to environmental progress. Nevertheless, it is not certain whether the use of AI is beneficial or not for environmental progress.

Considering the rising critical importance of AI use in many areas, along with the aforementioned factors, this research aims to uncover the role of AI on CO<sub>2</sub> emissions. In doing this, the study focuses on the case of the USA as the leading economy in the world, uses yearly data from 1985 to 2021, and applies cointegration regression methods (i.e., CCR, DOLS, & FMOLS) for empirical analysis. The results of the econometric estimations reveal that AI-related patents, income, trade openness, and energy intensity have an increasing impact on CO<sub>2</sub> emissions in the USA, whereas the interaction of AI-related patents with REG has a reducing impact. By considering these determinations, the study discusses various policy recommendations that can be helpful for the USA in benefiting from AI to ensure decarbonization.

The remaining parts of the study are as follows: Section 2 explains the methodology applied and data used; Section 3 presents empirical results; Section 4 concludes with policy recommendations.

**Methods and Data.** A large body of studies investigates the factors influencing CO<sub>2</sub> emissions, mostly using the Environmental Kuznets Curve (EKC) and STIRPAT frameworks, which primarily focus on income and population impacts. Yet these approaches face well-documented shortcomings, as noted by Ezzati et al., Tisdell, Dinda, Brock and Taylor, and Berk et al. [7-11]. In light of these limitations, scholars such as Brock and Taylor, Criado et al., and Berk et al. argue for adopting broader, theoretically stronger modeling strategies [10-12]. Recent empirical literature increasingly integrates AI into analytical frameworks. Notably, scholars such as Wang et al., Xia and Ahmad, and Yang et al. systematically employ AI indicators to evaluate its environmental impacts [13-15].

AI technology alone may not necessarily lower or increase carbon emissions. The real impacts depend on several factors, including how and where the technology is used. AI technologies may make energy use much more efficient, but they also use a lot of energy, particularly in data centers and cloud computing. If the energy system is primarily based on renewable sources, then the growing energy demand for AI applications may not significantly increase carbon emissions. But if the energy system is mostly dependent on fossil fuels, the same AI technology may have the reverse impact and cause emissions to rise. Therefore, the incorporation of interaction terms is grounded in both theoretical and practical reasoning. Considering that the impact of AI patents on CO<sub>2</sub> emissions may depend on the level of renewable energy, an interactive model specification is proposed below. This model aims to empirically evaluate whether the impact of AI technologies on CO<sub>2</sub> emissions varies according to the energy structure. Additional economic, energy, and trade-related variables have also been included in this model. Considering the above-mentioned facts, the following model specification is proposed:

$$LCO2_t = \alpha_0 + \alpha_1 LAIP_t + \alpha_2 LGDP_t + \alpha_3 LTO_t + \alpha_4 LEI_t + \alpha_5 LREG_t * LAIP_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

where CO<sub>2</sub> denotes emissions per capita, GDP denotes GDP per capita, OP denotes international oil price, REG denotes renewable energy generation, and  $\varepsilon_t$  is an error term of the econometric model. Given its status, the signs of  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ , and  $\alpha_4$  are anticipated to be positive for the United States. In addition, the objective of this study is to empirically estimate whether the impact of AI technologies on CO<sub>2</sub> emissions varies according to the level of renewable energy. Therefore, the sign of  $\alpha_5$  is expected to be negative and statistically significant. This means that as the share of renewable energy increases, the emission-reducing impact of AI patents becomes stronger. Eq. (1) may be assessed using traditional econometric methods [16-18].

Specifically, the Canonical Cointegration Regression (CCR) [19], Dynamic Ordinary Least Squares (DOLS) [20, 21], Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS) were utilized [22, 23].

The stationarity properties of the variables under investigation were analyzed through the Augmented Dickey-Fuller (ADF) test by Dickey and Fuller [24]. Furthermore, the existence of cointegration among variables was assessed using the Engle-Granger cointegration test [25].

The study utilizes data from 1985 to 2021. CO<sub>2</sub> is measured in tons per person. AIP is indicated by a total number of AI-based patents. Income (GDP) is represented as gross domestic product per capita in US dollars at 2015 values. The REG represents the total amount of renewable energy production (trillion Btu). Trade Openness (TO) is the total trade as a percentage portion of GDP. It is calculated as the sum of exports and imports, with both variables represented as proportions of the GDP. Energy intensity (EI) is expressed as the ratio of total primary energy consumption to GDP (Btu per 2015 US \$). Data on CO<sub>2</sub> emissions is sourced from Global Carbon Atlas while REG and total primary energy consumption are sourced from the U.S. Energy Information Administration [26,27]. The data for AIP is collected from OECD [28]. The GDP and TO are sourced from the World Bank database [29].

**Results and discussion.** Initially, the stationary characteristics of the variables were evaluated using the Augmented Dickey-Fuller (ADF) test. According to the unit-root test results, all the variables under investigation became stationary after taking their first differences. Hence, it becomes appropriate to assess the long-run relationships among these variables. To this end, the Engle-Granger cointegration test was employed, and the results are presented in Table 1. The outcomes confirmed the existence of a long-run cointegrating relationship among the examined variables.

Table 1  
Results of the Cointegration Test

| Engle-Granger  |                      |              |                      |
|----------------|----------------------|--------------|----------------------|
| Tau-statistics | -5.942538<br>(0.027) | Z-statistics | -75.62384<br>(0.000) |

**Notes:** *p-values are in parenthesis.*

Lastly, the Canonical Cointegration Regression (CCR), Dynamic Ordinary Least Squares (DOLS), and Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS) methods were applied to estimate the long-run coefficients. The results obtained from these estimation techniques are presented in Table 2.

Table 2  
Findings of the Econometric Estimations

|          | CCR      | DOLS     | FMOLS    |
|----------|----------|----------|----------|
| AIP      | 0.13***  | 0.17***  | 0.14***  |
| GDP      | 1.27***  | 1.23***  | 1.25***  |
| TO       | 0.06***  | 0.06***  | 0.06***  |
| EI       | 0.97***  | 0.88***  | 0.91***  |
| REG*AIP  | -0.02*** | -0.02*** | -0.02*** |
| Constant | 7.51***  | 6.25***  | 6.55***  |
| Trend    | -0.01*** | -0.01*** | -0.01*** |

**Notes:** \*\*\*, \*\*, and \* display rejecting the null hypothesis at a 1%, 5%, and 5% significance level, respectively.

The optimal lag length is determined using the Akaike information criterion (AIC). Table 2 demonstrates consistent results across all applied estimation methods, with parameters exhibiting similar signs and magnitudes. Specifically, the interaction term between renewable energy production and AI-related patents consistently shows a negative and statistically significant impact across methods. This means that when the share of renewable energy is high, the emission-reducing

impact of AI patents is stronger. This evidence suggests that enhanced renewable energy deployment mitigates the sensitivity of the United States' CO<sub>2</sub> emissions to fluctuations in AI-related patents. Moreover, AI-related patents, GDP, trade openness, and energy intensity individually exhibit positive and statistically significant impacts on CO<sub>2</sub> emissions. To investigate further, Figure 1 presents values of CO<sub>2</sub> emissions versus values of per capita renewable energy generation and AI-related patents.

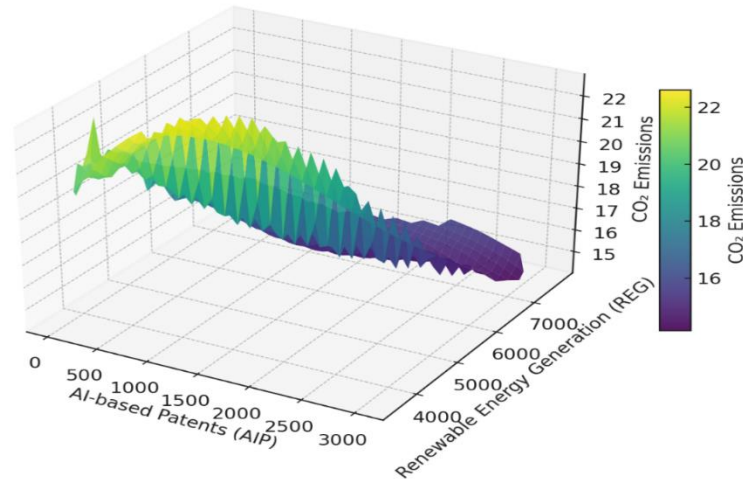


**Figure 1.** CO<sub>2</sub> emissions vs AIP and REG [26-28].

As seen in Figure 1, when both AI-based patents (AIP) and renewable energy generation (REG) are low, CO<sub>2</sub> emissions tend to be high, indicating a lack of technological innovation and clean energy infrastructure. Even when AIP is high but REG remains low, CO<sub>2</sub> emissions continue to stay elevated, largely due to the substantial energy demand associated with AI technologies, which are often powered by fossil-based energy systems. However, when both AIP and REG are high, CO<sub>2</sub> emissions begin to decline. This pattern demonstrates that the carbon-reduction potential of AI-based technologies is only effectively realized when the energy system is sufficiently “green”. In other words, technological advancement alone is not enough. Its environmental benefits are conditional on the sustainability of the underlying energy infrastructure.

**Conclusions.** The findings of this study offer valuable insights into the complex relationships linking This research explored the impact of AI-related patents, GDP, trade openness, energy intensity, and CO<sub>2</sub> emissions in the United States. Consistently, the results highlight that the interaction between AI-related patents and renewable energy production has a negative and statistically significant impact on CO<sub>2</sub> emissions. This notable finding underscores that the production of renewable energy has the potential to mitigate the impact of AI technologies on CO<sub>2</sub> emissions. Furthermore, the study also detects a positive and statistically significant influence of AI-related patents, GDP, trade openness, and energy intensity on CO<sub>2</sub> emissions.

Based on the obtained results, the following policy recommendations are proposed: a) As can be seen from estimation results, AI technologies have an emission-reducing impact only when the energy system is "green". Therefore, AI applications should primarily be used in renewable energy infrastructure and energy management (e.g., smart grids, and energy forecasting). In this context, AI strategies integrated with renewable energy should be developed. b) The finding that trade openness increases emissions indicates that the structure of imports and exports needs to be regulated. The transfer of AI-based technologies should be promoted jointly with green technologies. c) Green-oriented incentives should be provided for AI innovations. Specifically, government policies should prioritize support for energy-efficient and carbon-neutral AI projects. d) Considering the impact of

energy intensity on CO<sub>2</sub> emissions, AI applications should be used to promote process optimization, reduce energy losses, and encourage automation.

### References

1. Ozcan, B., Kılıç Depren, S., & Kartal, M. T. (2024). Impact of nuclear energy and hydro electricity consumption in achieving environmental quality: Evidence from load capacity factor by quantile based non-linear approaches. *Gondwana Research*, 129, 412-424.
2. Ulussever, T., Kartal, M. T., & Kılıç Depren, S. (2023). Effect of income, energy consumption, energy prices, political stability, and geopolitical risk on the environment: Evidence from GCC countries by novel quantile-based methods. *Energy & Environment*, 36(2), 979-1004.
3. Marra, A., Colantonio, E., Cucculelli, M., & Nissi, E. (2024). The ‘complex’ transition: Energy intensity and CO<sub>2</sub> emissions amidst technological and structural shifts. Evidence from OECD countries. *Energy Economics*, 136, 107702.
4. Arshad, S., Joseph, S., Rahman, S. U., Idress, S., & Shahid, T. A. (2024). Decarbonizing the future: A critical review of green energy, financial inclusion and trade openness on CO<sub>2</sub> emissions. *Bulletin of Business and Economics*, 13(2), 160-163.
5. Dong, M., Wang, G., & Han, X. (2024). Impacts of artificial intelligence on carbon emissions in China: in terms of artificial intelligence type and regional differences. *Sustainable Cities and Society*, 113, 105682.
6. Alatalo, J., Heilimo, E., Rantonen, M., Väänänen, O., & Sipola, T. (2025). Reducing Emissions Using Artificial Intelligence in the Energy Sector: A Scoping Review. *Applied Sciences*, 15(2), 999.
7. Ezzati, M., B. H. Singer, and Kammen D. M. (2001). Towards an Integrated Framework for Development and Environmental Policy: The Dynamics of Environmental Kuznets Curves, *World Development*, 29(8), 1421 - 1434.
8. Tisdell, C. (2001). Globalization and sustainability: environmental Kuznets curve and the WTO, *Ecological Economics*, 39, 185 -196.
9. Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431-455.
10. Brock, W. A., & Taylor, M. S. (2010). The green Solow model. *Journal of Economic Growth*, 15(2), 127-153.
11. Berk, I., Onater-Isberk, E., & Yetkiner, H. (2022). A unified theory and evidence on CO<sub>2</sub> emissions convergence. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(14), 20675-20693.
12. Criado, C. O., Valente, S., & Stengos, T. (2011). Growth and pollution convergence: Theory and evidence. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62(2), 199-214.
13. [Wang, Q., Li, Y., & Li, R. (2024). Ecological footprints, carbon emissions, and energy transitions: the impact of artificial intelligence (AI). *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 1-18.
14. Xia, Y., & Ahmad, M. (2025). Industrial Robotics, Resource Efficiency, Energy Transition, and Environmental Quality: Designing a Sustainable Development Goals Framework for G7 Countries in the Presence of Geopolitical Risk. *Sustainability*, 17(5), 1960.
15. Yang, X., Chen, H., Li, B., Jia, D., & Ahmad, M. (2025). The relationship between artificial intelligence, geopolitical risk, and green growth: Exploring the moderating role of green finance and energy technology. *Technological Forecasting and Social Change*, 217, 124135.



16. Jin, T. (2022). The effectiveness of combined heat and power (CHP) plant for carbon mitigation: Evidence from 47 countries using CHP plants. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101809.
17. Jin, T., & Kim, D. (2023). The role of renewable energy in hedging against oil price risks: A study of OECD net oil importers. *Renewable Energy*, 218, 119325.
18. Mukhtarov, S., Azizov, M., Kartal, M.T., & Eynalov, H. (2024), Catalyzing green transformation: mitigating oil price impact on CO<sub>2</sub> emissions in Saudi Arabia via renewable energy transition. *Environ Econ Policy Stud.* <https://doi.org/10.1007/s10018-024-00416-1>
19. Park, J. Y. (1992). Canonical cointegrating regressions. *Econometrica*, 60 (1), 119-143. <http://dx.doi.org/10.2307/2951679>.
20. Saikkonen, P. (1992). Estimation and testing of cointegrated systems by an autoregressive approximation. *Econometric Theory*, 8, 1-27.
21. Stock, J. H., Watson, M.W. (1993). A simple estimator of cointegrating vectors in higher order integrated systems. *Econometrica*, 61, 783-820.
22. Hansen, B. E. (1992). Efficient estimation and testing of cointegrating vectors in the presence of deterministic trends. *Journal of Econometrics*, 53(1-3), 87-121.
23. Phillips, P. C., & Hansen, B. E. (1990). Statistical inference in instrumental variables regression with I (1) processes. *The Review of Economic Studies*, 57(1), 99-125.
24. Dickey, D.A., Fuller Wayne F. (1981) Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica*, 49, 1057-1072.
25. Engle, R.F., Granger, C.W.J. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation and testing. *Econometrica*, 55, 251-276.
26. Global Carbon Atlas, (2025). <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions>.
27. U.S. Energy Information Administration (2025). <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/index.php#renewable>
28. OECD. (2025). Data of EPS and AI-Related Patents. <https://data-explorer.oecd.org>
29. World Bank. (2025). World Development Indicators. <https://data.worldbank.org/indicator>

## SÜNİ İNTELLEKT ƏSASLI İNNOVASİYALARIN ƏTRAF MÜHİTƏ TƏSİRİ: AMERİKA BİRLƏŞMİŞ ŞTATLARI NÜMUNƏSİ

Muxtarov Ş.Z., Kartal M.T.

**Xülasə.** Bu tədqiqat Birləşmiş Ştatlarda Karbon dioksid (CO<sub>2</sub>) emissiyalarına Süni İntellekt (Sİ) ilə bağlı patentlər, gəlir, ticarət açıqlığı və enerji intensivliyinin təsirini araşdırır. Bu əlaqəni öyrənmək üçün Kanonik Kointeqrasiya Regressiyası (CCR), Dinamik Ən Kiçik Kvadratlar (DOLS) və Tam Modifikasiya Olunmuş Ən Kiçik Kvadratlar (FMOLS) metodlarından istifadə olunmuşdur. Tətbiq edilən metodların nəticələri göstərir ki, Sİ ilə bağlı patentlər, gəlir, ticarət açıqlığı və enerji intensivliyi CO<sub>2</sub> emissiyalarına müsbət və statistik olaraq əhəmiyyətli təsir göstərir. Bundan əlavə, bərpa olunan enerji istehsalı ilə Sİ ilə bağlı patentlərin birgə təsirini ifadə edən interaktiv dəyişən CO<sub>2</sub> emissiyalarına mənfi və statistik olaraq əhəmiyyətli təsir göstərdiyi nəticəsi əldə olunmuşdur. Bu əsas nəticə göstərir ki, bərpa olunan enerji istehsalı (BƏİ) Azərbaycanın CO<sub>2</sub> emissiyalarının global neft qiymətlərindəki dəyişikliklərə qarşı həssaslığını effektiv şəkildə azaldır. Nəticə etibarilə, bu tədqiqatdan irəli gələn siyasət tövsiyələri vurğulayır ki, Sİ-nin emissiyaları azaltması üçün sənaye və nəqliyyatda enerji intensivliyi Sİ vasitəsilə azaldılmalı, Sİ bərpa olunan enerji ilə integrasiya olunmalı, əsasən enerji baxımından səmərəli layihələr təşviq edilməli və Sİ-yə əsaslanan yaşıl texnologiyaların ticarəti gücləndirilməlidir.

**Açar sözlər:** Azərbaycan, CO<sub>2</sub> emissiyaları, iqtisadi artım, beynəlxalq neft qiymətləri, bərpa olunan enerji istehsalı, dayanıqlı inkişaf

## İSTEHSAL SAHƏLƏRİNDƏ SÜNİ İNTELLEKTİN TƏTBİQİ İLƏ DÖVLƏT MALİYYƏSİNİN GÜCLƏNDİRİLMƏSİ: SƏMƏRƏLİLİK, GƏLİR ARTIMI VƏ İNNOVATİV YANAŞMALAR



**Əmirova R.M.**

*Fövqəladə Hallar Nazirliyinin Akademiyası, Bakı, Azərbaycan*  
*roya.amirova@fhn.gov.az*

**Xülasə.** Bu məqalədə süni intellektin (Sİ) istehsal sahələrində tətbiqinin dövlət maliyyəsinin formalaşmasına təsiri araşdırılır. Müasir iqtisadi çağırışlar kontekstində Sİ-nin sənaye proseslərinə integrasiyası yalnız məhsuldarlığın artırılması və xərclərin optimallaşdırılması ilə məhdudlaşmır, eyni zamanda dövlətin fiskal dayanıqlığının gücləndirilməsi baxımından da mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Məqalədə istehsal müəssisələrində Sİ-nin tətbiq sahələri – proqnozlaşdırıcı texniki xidmət, avtomatlaşdırılmış idarəetmə, keyfiyyət nəzarət sistemləri və rəqəmsal əkizlər texnologiyaları – iqtisadi faydalar prizmasından qiymətləndirilmişdir.

Süni intellektin tətbiqi nəticəsində istehsal gücünün və rəsmi dövriyyənin artması, qeyri-rəsmi iqtisadiyyatın azalması, vergi bazasının genişlənməsi və nəticə etibarilə dövlət büdcəsinə daxilolmaların yüksəlməsi müşahidə edilir. Bundan əlavə, məqalədə Sİ-nin idxaldan asılılığı azaltmaqla tədiyyə balansına və milli valyutanın sabitliyinə göstərdiyi dolaylı təsirlər də nəzərdən keçirilir.

Azərbaycan Respublikasının “Rəqəmsal Transformasiya” və “Milli İnkişaf Prioritetləri – 2030” sənədləri fonunda aparılan təhlillər sübut edir ki, süni intellektin istehsal sahələrinə tətbiqi dövlət gəlirlərinin artımında və büdcə sabitliyinin təmin olunmasında mühüm rol oynaya bilər. Məqalədə həmçinin bu istiqamətdə dövlət siyasətinin formalaşdırılması üçün tövsiyələr irəli sürülür.

**Açar sözlər:** süni intellekt, dövlət maliyyəsi, istehsal sahələri, rəqəmsal iqtisadiyyat, fiskal dayanıqlılıq, sənaye 4.0, vergi gəlirləri

**Giriş.** Qloballaşma və texnoloji tərəqqinin sürətlənməsi müasir dövrdə iqtisadi sistemlərin rəqəbatqabiliyyətini artırmaq üçün süni intellektin (Sİ) tətbiqini zəruri etmişdir. Xüsusilə istehsal sahələrində Sİ-nin tətbiqi əməyin məhsuldarlığını artırmaq, xərcləri optimallaşdırmaq və resurslardan daha səmərəli istifadə etməklə iqtisadi artımı sürətləndirməkdə mühüm rol oynayır. Bu isə dolaylı yolla dövlətin maliyyə dayanıqlılığına və gəlir bazasının genişlənməsinə təsir edir.

Bu mövzunun seçilməsində əsas məqsəd istehsal sahələrinin dövlət maliyyəsinin formalaşmasında oynadığı rolu araşdırmaqla yanaşı, bu sahənin süni intellekt kimi müasir texnologiyalarla zənginləşdirilməsinin fiskal nəticələrini qiymətləndirmək istəyi ilə bağlıdır. İndiyədək aparılan yerli və beynəlxalq tədqiqatlar əsasən texniki aspektlərə və mikroiqtisadi nəticələrə fokuslanmış, dövlət maliyyəsinə təsiri isə ya qeyri-kafi şəkildə təhlil olunmuş, ya da ümumiləşdirici xarakter daşmışdır.

**Süni intellektin istehsal sahələrində tətbiq sahələri.** Süni intellektin istehsal sahələrində tətbiqi müasir iqtisadiyyatın rəqəmsal transformasiyası çərçivəsində getdikcə genişlənir və sənaye müəssisələrinin səmərəliliyinin artırılmasında əsas texnoloji alətə çevrilir. Sİ-nin bu sahədə tətbiqi yalnız texniki prosesləri təkmilləşdirmir, eyni zamanda istehsalatın dəyər zəncirini optimallaşdıraraq, dövlətin fiskal gəlirlərinə də dolaylı təsir göstərir.

Süni intellektin istehsalatdakı əsas tətbiq sahələri aşağıdakılardır:

1. Proqnozlaşdırıcı texniki xidmət (Predictive maintenance)-avadanlıqların nasazlıqlarını əvvəlcədən təyin etməklə istehsalda fasiləsizlik təmin olunur. Ənənəvi texniki xidmət modelləri əsasən planlı şəkildə həyata keçirilir. Sİ isə sensorlardan və böyük verilərdən istifadə edərək avadanlıqların nasazlıq riskini əvvəlcədən təyin edir, bu da istehsalda gözlənilməz fasilələrin qarşısını alır və məhsuldarlığı artırır.

2. Keyfiyyətə nəzarət sistemləri - maşın öyrənməsi və kompüter görüntülmə texnologiyaları vasitəsilə məhsulların keyfiyyəti istehsal zamanı avtomatik şəkildə yoxlanılır. Bu texnologiyalarla keyfiyyətsiz məhsullar vaxtında müəyyən edilərək itkilərin və resurs israfının qarşısı alınır.

3. İstehsal proseslərinin avtomatlaşdırılması və idarəedilməsi dedikdə, insan əməyinin azaldılması və istehsal proseslərinin sürətlənməsi nəzərdə tutulur. Belə ki, Sİ əsaslı idarəetmə sistemləri (məsələn, robotik proses avtomatlaşdırılması – RPA) vasitəsilə kompleks istehsal əməliyyatları minimum insan müdaxiləsi ilə həyata keçirilir. Bu həm məhsuldarlığı artırır, həm də əmək xərclərini azaldır.

4. Təchizat zəncirinin optimallaşdırılması - Süni intellekt verilənlər əsasında təchizat və tələbat modellərini təhlil edərək material və məhsul axınını optimallaşdırır. Beləliklə, ehtiyatların idarə edilməsi səmərəli olur və saxlanma xərcləri azalır.

5. Rəqəmsal əkizlər (Digital Twins) - Bu texnologiya real istehsal obyektinin virtual surətini yaratmaqla istehsal prosesinin simulyasiyasına və təkmilləşdirilməsinə imkan verir. Real vaxtda monitoring və simulyasiya imkanları qərarların effektivliyini artırır.

6. Enerji sərfiyyatının idarə olunması - Süni intellekt enerjiddən istifadənin analizi və proqnozu ilə enerji səmərəliliyini artırır. Bu xüsusilə enerji-istehlakı yüksək olan sənaye sahələrində əhəmiyyətlidir.

Süni intellektin bu tətbiqləri istehsal proseslərini daha çevik, şəffaf və məhsuldar edir. Belə texnoloji inkişaf nəticəsində istehsal müəssisələrinin gəlirləri artır, vergi bazası genişlənir və dövlət maliyyəsinə daxilolmalar artım tendensiyası göstərir. Bu isə istehsalın gücləndirilməsi yolu ilə dövlət maliyyəsinin formalaşmasına birbaşa xidmət edir.

**Süni intellektin tətbiqi ilə dövlət maliyyəsinin gücləndirilməsi mexanizmləri.** Süni intellektin (Sİ) istehsal sahələrinə tətbiqi nəticəsində yalnız mikro səviyyədə iqtisadi effektivlik deyil, makro səviyyədə – xüsusilə dövlət maliyyəsinin möhkəmləndirilməsi sahəsində də əhəmiyyətli nəticələr əldə olunur. Bu təsirlər bir neçə əsas mexanizm vasitəsilə həyata keçir:

1. Vergi bazasının genişlənməsi. Süni intellektin tətbiqi nəticəsində məhsuldarlığın artması, istehsalın miqyasının genişlənməsi və satış dövriyyəsinin yüksəlməsi müşahidə olunur. Bu isə əlavə dəyər vergisi (ƏDV), mənfəət vergisi və gəlir vergisi üzrə daxilolmaların artmasına səbəb olur. Avtomatlaşdırılmış və rəqəmsallaşmış istehsal sistemləri əməliyyat şəffaflığını təmin etməklə qeyri-rəsmi dövriyyənin və vergi yayındırmalarının azalmasına səbəb olur [1].

2. İdxaldan asılılığın azaldılması və milli məhsulun stimullaşdırılması. Süni intellektlə təkmilləşdirilmiş istehsal sistemləri daha keyfiyyətli və rəqabətqabiliyyətli yerli məhsulların istehsalına imkan verir. Bu isə idxal məhsullarına olan tələbi azaldır, tədiyyə balansını yaxşılaşdırır və valyuta axınının ölkə daxilində qalmasına səbəb olur. Nəticədə gələcəkdə fiskal sabitlik üçün şərait yaranır [2].

3. Yeni iş yerlərinin və vergiödəyici subyektlərin yaranması. Sİ-nin tətbiqi yüksək texnologiyalı yeni sahələrin yaranmasına, ixtisaslı işçi qüvvəsinə tələbatın artmasına və nəticə etibarilə fiziki şəxslərdən və müəssisələrdən vergi daxilolmalarının genişlənməsinə səbəb olur [3].

4. Dövlət subsidiyalarının optimallaşdırılması. Ənənəvi sənaye müəssisələrində yüksək enerji və resurs sərfiyyatına görə dövlət subsidiyalarına ehtiyac yaranır. Lakin süni intellekt vasitəsilə istehsal prosesləri optimallaşdırıldıqda xərclər azalır və dövlətin maliyyə yükü yüngülləşir [4].

Bu mexanizmlərin kombinasiyası dövlətin maliyyə gəlirlərini artırmaqla bərabər, xərcləri rasionallaşdırır, beləliklə büdcə balansını və maliyyə sabitliyini möhkəmləndirir.

**Azərbaycan reallığında süni intellekt və sənayeləşmə prosesi.** Azərbaycan Respublikası rəqəmsal iqtisadiyyata keçid və sənayeləşmənin sürətləndirilməsi istiqamətində ardıcıl addımlar atmaqdadır. Bu çərçivədə süni intellektin sənaye sahələrində tətbiqi ilə dövlət maliyyəsi arasında qarşılıqlı əlaqələrin qurulması aktuallaşır.

“Azərbaycan 2030: Sosial-iqtisadi inkişafa dair Milli Prioritetlər” sənədində rəqabətqabiliyyətli iqtisadiyyat və rəqəmsal inkişaf əsas məqsədlərdən biri kimi göstərilir [5]. Eyni zamanda “Rəqəmsal Transformasiya Konsepsiyası” sənədində süni intellektin prioritet sahə kimi inkişaf etdirilməsi nəzərdə tutulur [6].

Hazırda sənayeləşmə prosesinin mərkəzində yerləşən Sumqayıt Kimya Sənaye Parkı və Pirallahı Sənaye Parkı kimi ərazilərdə rəqəmsal istehsal avadanlıqları və texnologiyalarının tətbiqinə başlanılıb. Bu yanaşmalar məhsuldarlığın artması və ixrac potensialının güclənməsi ilə dövlət gəlirlərinə təsir edir.

Süni intellekt üzrə startap mühiti və innovasiya təşəbbüslərinə gəldikdə, SON (Smart Offloading Network), Azercell AI Lab, İnnovasiyalar Agentliyi və digər qurumlar tərəfindən SI sahəsində startaplar dəstəklənir. Bu təşəbbüslər istehsal sahəsinə integrasiya olunmaqla fiskal təsirlərə malik ola bilər.

Lakin Azərbaycan reallığında texnologiyaların yayılma sürəti, texnoloji savadlılıq səviyyəsi və özəl sektorun adaptasiya imkanları bəzi hallarda məhduddur. Buna görə də dövlətin maliyyə və institusional dəstəyi süni intellektin sənayedə real təsir gücünü artırmaq üçün həlledici rol oynayır. Azərbaycan iqtisadiyyatının sənayeləşmə və rəqəmsallaşma mərhələsində olması, süni intellekt texnologiyalarının istehsal sahəsində tətbiqini dövlət maliyyəsinin gücləndirilməsi baxımından strateji vasitəyə çevirir.

**Müxtəlif ölkələrdə süni intellektin sənayedə tətbiqinin fiskal nəticələrinin müqayisəli təhlili.** ABŞ-da sənaye sektorunda süni intellektin tətbiqi məhsuldarlığın kəskin şəkildə artmasına, əməliyyat xərclərinin azalmasına və vergi gəlirlərinin yüksəlməsinə səbəb olmuşdur. McKinsey Global Institute-un araşdırmasına əsasən, yalnız avtomatlaşdırma və proqnozlaşdırıcı analiz vasitəsilə sənaye müəssisələrində istehsal səmərəliliyi 20-25% artmış, bu isə federal və ştat səviyyəsində əlavə vergi gəlirləri yaratmışdır [7].

"Industrie 4.0" strategiyası çərçivəsində Almaniyada SI-nin tətbiqi istehsalat proseslərinin rəqəmsallaşdırılmasını sürətləndirmiş, nəticədə yüksək texnologiyalı məhsul ixracatı və sənaye vergisi daxilolmaları artmışdır. 2021-ci ildə Almaniya Maliyyə Nazirliyinin hesabatında göstərilir ki, SI əsaslı texnologiyaların tətbiqi sənayedə əlavə 11 milyard avro həcmində büdcə gəliri formalaşdırmışdır [8].

Yaponiyada süni intellektin əsasən robototexnika və ağıllı logistika sistemlərində tətbiqi vergi bazasının genişlənməsinə xidmət etmişdir. Mitsubishi və Toyota kimi şirkətlərdə həyata keçirilən rəqəmsallaşma və SI tətbiqi nəticəsində dövlətə ödənilən vergi həcmi 15% artmışdır. Yaponiya İqtisadiyyat, Ticarət və Sənaye Nazirliyi 2022-ci ildə qeyd etmişdir ki, SI-nin sənayedə tətbiqi dövlət büdcəsinə illik 2,5 trilyon yen əlavə gəlir gətirmişdir [9].

Azərbaycanda süni intellektin sənayedə geniş tətbiqi yeni inkişaf mərhələsində olsa da, artıq müsbət fiskal nəticələr əldə olunmağa başlanmışdır. “Azərbaycan 2030: sosial-iqtisadi inkişafa dair Milli Prioritetlər” sənədində sənayeləşmənin və rəqəmsallaşmanın fiskal təsirləri önə çəkilir. Pilot layihələr çərçivəsində tətbiq olunan SI texnologiyaları məhsuldarlıqda 10-12% artım yaratmış, bu isə dövlət büdcəsinə əlavə vergi və sosial sığorta daxilolmaları ilə müşayiət olunmuşdur [10].

Beləliklə, ABŞ və Almaniya kimi inkişaf etmiş ölkələrdə SI-nin sənayedə tətbiqi büdcəyə ciddi gəlir artımı gətirdiyi halda, Yaponiya bu texnologiyadan daha çox robotlaşdırma sahəsində istifadə edərək fiskal sabitliyə nail olmuşdur. Azərbaycan isə bu prosesin başlanğıcında olsa da, iqtisadiyyatda rəqəmsallaşmanın dövlət maliyyəsinə verdiyi töhfəni artıq hiss edir və gələcəkdə bu göstəricilərin daha da yüksəlməsi gözlənilir.

Azərbaycan Respublikasının 2025–2028-ci illər üçün Süni İntellekt Strategiyası gələcək perspektivlər baxımından milli iqtisadiyyatın, xüsusilə də istehsal sahələrinin modernləşdirilməsində mühüm mərhələ kimi qiymətləndirilə bilər. Strategiyada nəzərdə tutulan hədəflərin icrası yaxın illərdə dövlət maliyyəsinin gücləndirilməsinə xidmət edən bir sıra innovativ imkanlar yaradır:

1. İstehsalatın rəqəmsallaşdırılması və avtomatlaşdırılması nəticəsində məhsuldarlıq artacaq, israf azalacaq və nəticə etibarilə vergi ödəmə potensialı yüksək olan daha rentabelli müəssisələr formalaşacaqdır. Bu isə qeyri-neft sektorunun büdcəyə töhfəsini artıracaqdır.
2. Yüksək texnoloji məhsul istehsalının artması ixrac potensialını genişləndirəcək və xarici valyuta gəlirlərinin çoxalmasına səbəb olacaqdır. Bu da həm büdcə gəlirlərinin, həm də ölkənin fiskal dayanıqlılığının möhkəmlənməsinə zəmin yaradacaqdır.
3. Süni intellekt sahəsində milli kadr potensialının inkişafı və yeni peşələrin formalaşması əmək bazarına müsbət təsir göstərəcək, qeyri-formal məşğulluğun azaldılması ilə sosial sığorta və vergi yığımalarını artıracaqdır.
4. İnnovasiya və texnoloji startapların təşviqi dövlətin investisiya gəlirlərini artırır, həmçinin risklərin daha dəqiq idarə olunmasına şərait yaradaraq maliyyə sabitliyinə töhfə verə bilər.

Süni intellektin istehsal sahələrində geniş miqyasda tətbiqi dövlətin fiskal siyasətinin daha çevik, proqnozlaşdırıla bilən və səmərəli şəkildə formalaşmasına imkan verəcəkdir. Bu isə dövlətin yalnız gəlir hissəsini deyil, eyni zamanda xərclərin optimallaşdırılmasını və maliyyə dayanıqlılığını təmin edəcək. Strategiyanın icrası həm də Azərbaycanın regionda rəqəmsal sənaye iqtisadiyyatı liderlərindən birinə çevrilməsi üçün mühüm platforma hesab edilə bilər.

**Metodlar.** Tədqiqatda keyfiyyət və kəmiyyət yanaşmaları birgə istifadə olunmuşdur. İstifadə olunan metodlarda süni intellektin istehsal sahələrində tətbiqi və onun iqtisadi göstəricilərə təsiri izah edilmişdir. Aparılan müqayisəli təhlil əsasında müxtəlif ölkələrdə (ABŞ, Almaniya, Yaponiya və Azərbaycan) sənaye sahələrində Sİ-nin tətbiqi ilə bağlı fiskal nəticələr müqayisə olunmuşdur. Məlumatların toplanması üçün həm rəsmi statistik bazalardan, həm də akademik mənbələrdən istifadə edilmiş, Azərbaycan Respublikası Dövlət Statistika Komitəsinin və Maliyyə Nazirliyinin statistik məlumatları, beynəlxalq təşkilatların hesabatları (OECD, WEF, WB) təhlil olunmuşdur.

**Nəticə.** Tədqiqat nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, süni intellektin istehsal sahələrinə tətbiqi nəticəsində məhsuldarlıq təxminən 20–30% artır, istehsal xərcləri azalır və rəqəbat qabiliyyəti yüksəlir. Bu isə dövlət büdcəsinə daxil olan vergi və qeyri-vergi gəlirlərində artım yaradır. Xüsusilə əlavə dəyər vergisi (ƏDV), mənfəət vergisi və əmək bazarında genişlənmə nəticəsində gəlir vergisi üzrə daxilolmalar artır.

Əldə edilən nəticələr bir sıra beynəlxalq tədqiqatlarla (məsələn, OECD və McKinsey hesabatları) uyğunluq təşkil edir. Lakin Azərbaycanın kontekstində bu tendensiyalar hələ ilkin mərhələdədir və dövlət dəstəyi olmadan geniş tətbiq mümkün deyil. Müzakirələr göstərir ki, süni intellektin tətbiqi yalnız iqtisadi deyil, həm də maliyyə baxımından strateji əhəmiyyət daşıyır və fiskal dayanıqlılığa töhfə verir.

Gələcək tədqiqatlar bu mövzu üzrə daha geniş empirik araşdırmalarla – sektorlar üzrə təsir modellərinin qurulması, vergi yığımındakı dinamikanın öyrənilməsi və regional fərqliliklərin analizi ilə zənginləşdirilə bilər.

Bu araşdırma nəticələri dövlət siyasətinin formalaşdırılmasına töhfə verir və istehsalın rəqəmsallaşdırılması ilə dövlət maliyyəsinin dayanıqlılığının artırılması arasında möhkəm əlaqə olduğunu sübut edir.

**Təkliflər.** Tədqiqatın obyektı və predmetinə dair təkliflər aşağıdakılardan ibarətdir:

- İstehsal sahələrində Sİ texnologiyalarının tətbiqinə dövlət tərəfindən vergi güzəştləri və investisiya stimulları verilməlidir.



- Dövlət və özəl sektor arasında rəqəmsal transformasiya üzrə ortaq platformalar yaradılmalıdır.

- Sənaye müəssisələri üçün rəqəmsal diaqnostika proqramları və təlimlər həyata keçirilməli, SI tətbiqlərinin iqtisadi effektləri ölçülməlidir.

### Ədəbiyyat

1. OECD. (2021). "Artificial Intelligence in Society". OECD Publishing.
2. Schwab, K. (2016). "The Fourth Industrial Revolution". World Economic Forum.
3. Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2017). "Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future". W. W. Norton & Company.
4. World Bank. (2020). "The Future of Work in Europe: Automation, Workforce Transitions, and the Role of Policy".
5. Azərbaycan Respublikası Prezidenti. (2021). "Azərbaycan 2030: Sosial-iqtisadi inkişafa dair Milli Prioritetlər". Bakı.
6. Azərbaycan Respublikası Rəqəmsal İnkişaf və Nəqliyyat Nazirliyi. (2022). "Rəqəmsal Transformasiya Konsepsiyası". Bakı.
7. McKinsey Global Institute. (2023). The Future of Work in Manufacturing.
8. Bundesministerium der Finanzen. (2021). Steuereinnahmen aus Industrie 4.0
9. Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). (2022). AI-driven Growth in Manufacturing.
10. Azərbaycan Respublikası İqtisadiyyat Nazirliyi. (2023). Sənayeləşmə və rəqəmsal inkişaf hesabatı.

## STRENGTHENING PUBLIC FINANCE THROUGH THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MANUFACTURING: EFFICIENCY, REVENUE GROWTH, AND INNOVATIVE APPROACHES

Amirova R.M.

**Abstract.** *This paper examines the impact of Artificial Intelligence (AI) applications in manufacturing on the formation and sustainability of public finance. In the context of modern economic challenges, the integration of AI into industrial processes is not limited to enhancing productivity and optimizing costs; it also plays a significant role in strengthening fiscal stability. The paper evaluates key AI application areas in production enterprises—predictive maintenance, automated control systems, quality assurance technologies, and digital twin solutions—from the perspective of their economic benefits.*

*The application of AI results in increased production capacity and formal economic activity, a reduction in the informal economy, expansion of the tax base, and ultimately, higher state budget revenues. The study also explores AI's indirect effects on reducing import dependency, improving the balance of payments, and contributing to national currency stability.*

*Based on the strategic documents of the Republic of Azerbaijan, including the "Digital Transformation" strategy and "National Development Priorities – 2030", the analysis shows that integrating AI into manufacturing can significantly enhance public revenue and ensure budgetary stability. The paper also provides policy recommendations to guide the formulation of national strategies aimed at effective AI adoption in the industrial sector.*

**Keywords:** artificial intelligence, public finance, manufacturing sector, digital economy, fiscal sustainability, industry 4.0, tax revenues

## THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN COMBAT VEHICLE CONTROL SYSTEMS



**Huseynov A.G.**

National Defense University, Baku, Azerbaijan  
ashraf.huseynov@gmail.com

**Abstract.** The integration of Artificial Intelligence (AI) in combat vehicle control systems is revolutionizing modern military operations. From autonomous vehicles to enhanced command and control systems, AI is transforming the way military forces manage and deploy combat vehicles on the battlefield. This article explores the role of AI in improving the capabilities of combat vehicles, particularly focusing on autonomous navigation, decision-making, and integration with broader military networks. It discusses how AI enables autonomous vehicles to navigate complex terrains, make real-time decisions, and enhance the effectiveness of military operations. Furthermore, AI's integration with command and control systems improves situational awareness, coordination, and resource allocation, leading to more efficient and timely responses to emerging threats. By examining the current applications of AI in combat vehicle systems, the article highlights the potential for further advancements, including more autonomous systems and increased collaboration between human operators and AI technologies. The future of AI in military operations promises enhanced operational readiness, reduced risks to personnel, and optimized strategic outcomes.

**Keywords:** artificial intelligence, combat vehicles, autonomous systems, military operations, command and control, military technology

**Introduction.** The integration of Artificial Intelligence (AI) in combat vehicle control systems marks a significant shift in modern warfare, offering advanced capabilities for both autonomous operations and enhanced decision-making. As military forces around the world increasingly adopt cutting-edge technologies, the role of AI in combat vehicles, from autonomous machines to seamless integration with command structures, has become a critical area of development. AI-driven systems are capable of improving operational efficiency, precision, and safety while reducing the reliance on human operators, ultimately transforming the battlefield.

This article explores the application of AI in combat vehicle control systems, focusing on its use in autonomous vehicles and its integration with broader military command and control systems. By examining current developments and potential future innovations, the article aims to shed light on the ways AI can enhance the capabilities of combat vehicles, enabling them to perform more effectively in complex and dynamic operational environments.

**Main part.** The development of autonomous combat vehicles represents one of the most transformative applications of AI in modern military technology. These vehicles, which include autonomous tanks, unmanned ground vehicles (UGVs), and drones, are designed to operate without direct human intervention, using AI systems to navigate, make decisions, and engage with targets autonomously [1].

**Autonomous Navigation and Decision-Making.** At the core of autonomous combat vehicles lies the AI-powered navigation system, which allows these vehicles to travel through complex terrain without human guidance. AI systems process real-time data from radar, LIDAR, cameras, and sensors to create a detailed understanding of the environment, enabling the vehicle to avoid

obstacles, select optimal routes, and adjust to changes in real-time. Machine learning algorithms continuously improve these systems, allowing the vehicle to adapt to new environments and increasingly complex scenarios, from urban combat zones to difficult terrain [2].

In addition to navigation, AI enhances decision-making capabilities in combat situations. Autonomous vehicles can analyze battlefield conditions, detect threats, and make tactical decisions based on predefined rules and machine learning insights. These systems can engage targets independently, whether through defensive maneuvers or offensive actions, with high precision and minimal human oversight. Such capabilities not only increase the speed of operations but also reduce the risk to human soldiers in high-risk environments [3].

**Enhancing Combat Effectiveness and Safety.** One of the key advantages of autonomous combat vehicles is their ability to perform dangerous tasks without exposing human soldiers to risk. For example, autonomous unmanned ground vehicles (UGVs) are often deployed for explosive ordnance disposal (EOD), reconnaissance, or in clearing mines from conflict zones. By using AI to perform these tasks, the military significantly reduces casualties while ensuring that operations are carried out with greater precision and efficiency.

Moreover, AI systems can optimize the operation of combat vehicles in real-time. For instance, during active combat, AI can process environmental data and battlefield conditions to adjust vehicle speed, positioning, and weaponry to ensure maximum effectiveness in engagement while maintaining the safety of the vehicle [4,5]. The AI's ability to continually evaluate situational factors gives autonomous vehicles a dynamic advantage over traditional vehicles, which rely more heavily on human decision-making and response times.

While autonomous vehicles represent a significant advancement in military technology, their true potential is realized when they are integrated with broader command and control (C2) systems. The synergy between AI-powered combat vehicles and central military command networks enhances situational awareness, improves coordination, and facilitates real-time decision-making across multiple operational units [6].

By integrating AI with C2 systems, autonomous vehicles become an essential part of a networked force. AI can process and analyze vast amounts of data from both ground and aerial sensors, providing commanders with a comprehensive understanding of the battlefield. This real-time data analysis ensures that commanders have up-to-date intelligence on enemy positions, terrain conditions, and the status of all deployed assets, allowing them to make quicker and more informed decisions.

AI systems within combat vehicles can also share their environmental assessments and operational status with other vehicles and units in the network. This interoperability ensures that military units are working from the same set of information, facilitating better coordination and synchronization across the battlefield. For example, autonomous vehicles can relay information on enemy movements or potential hazards to nearby friendly units, enabling faster, more efficient countermeasures and a more cohesive overall strategy.

While autonomous vehicles can operate independently, they are most effective when functioning in collaboration with human operators and commanders [7]. AI systems provide support to human decision-makers by offering data-driven insights and recommendations based on real-time analysis. These systems can prioritize tasks, assess risks, and suggest optimal courses of action, while still allowing human commanders to make the final decisions.

For instance, in a combat situation, an AI system in a combat vehicle might detect an enemy tank, assess its threat level, and recommend an engagement strategy based on its analysis of available data. The human operator would then have the final say in executing the decision, ensuring that human judgment and experience are not replaced but enhanced by AI capabilities.

Moreover, AI's ability to analyze large datasets quickly provides commanders with predictive insights, helping them anticipate enemy movements, resource shortages, or emerging threats before they fully materialize [8]. By augmenting human decision-making with AI-powered analytics, the military can improve strategic planning and operational readiness.

Looking ahead, AI in combat vehicle control systems will continue to evolve. As AI algorithms become more advanced, autonomous combat vehicles will likely become even more autonomous, requiring less direct oversight from human operators. Furthermore, with the advent of 5G and future communication networks, real-time data exchange between combat vehicles, drones, and central command systems will become even more seamless, enhancing the speed and accuracy of decision-making.

The use of machine learning and neural networks will enable combat vehicles to improve their performance over time, adapting to new environments and combat scenarios. Advanced algorithms will allow AI systems to make better predictions, optimize combat strategies, and respond to unforeseen challenges more effectively [9,10].

**Conclusion.** AI is transforming the control systems of combat vehicles, making them more autonomous, efficient, and integrated within broader military operations. By automating decision-making, enhancing situational awareness, and optimizing resource allocation, AI offers a new level of operational capability for modern militaries. As these technologies continue to advance, AI-driven combat vehicles will not only reduce risks to human soldiers but will also improve the effectiveness of military operations, enabling forces to respond to threats faster and more efficiently. The future of military combat vehicles lies in the continued integration of AI, which will redefine how military forces approach battlefield operations in the 21st century.

## References

1. Akhundov, R. (2023). Application of means of remote radiation reconnaissance. In Modern trends in the development of information and communication technologies and management tools. Abstracts of the Thirteenth International Scientific and Technical Conference. – Kharkiv, Ukraine, Vol. 2, pp. 8-9.
2. Akhundov, R. (2024). Environmental Warfare – Modern Global Challenge. In Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International scientific and practical conference, No. 7, pp. 332-335.
3. Akhundov, R. (2024). The Environmental Consequences of Military Activity. In 20 години България в НАТО и НАТО в България, Военна академия „Г. С Раковски“, pp. 410-422.
4. Akhundov, R. G. (2023). Methods of conducting chemical exploration. Abstracts of reports of the eleventh international scientific and technical conference "Problems of informatization". – Kharkiv, Ukraine, Vol 2, pp.104-105.
5. Akhundov, R., & Hashimov, E. (2025). Military activity and the environment: The need for a systemic approach to radiological and chemical safety. In Zdobutky ta dosyagnennya prykladnykh ta fundamental'nykh nauk XXI stolittya: Zbirnyk naukovykh prats z materialamy IX Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi. UKRLOGOS Group., pp. 187-196. <https://doi.org/10.62731/mcnd-16.05.2025.004>
6. Akhundov, R., & Hashimov, E. (2025). Radiation and chemical protection as a strategic priority of environmental security in the military sphere. In Zdobutky ta dosyagnennya prykladnykh ta fundamental'nykh nauk XXI stolittya: Zbirnyk naukovykh prats z materialamy IX Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi. UKRLOGOS Group., pp. 202-209 <https://doi.org/10.62731/mcnd-16.05.2025.005>
7. Akhundov, R., & Islamov, I. (2025). Implementation of new technologies for cleaning and neutralizing radiological and chemical contaminants in military environments. Матеріали

- конференцій МЦНД, Київ, Україна, pp.321-329. <https://doi.org/10.62731/mcnd-30.05.2025.006>
8. Bayramov, A. A., & Hashimov, E. G. (2019). Development of UAV SoS flight combat reconnaissance mission program. Advanced Information Systems, 3(1), pp/152-156. DOI: 10.20998/2522-9052.2019.1.25
  9. Hashimov, E. G., & Bayramov, A. A. (2015). Detection unobserved moving armored vehicles by seismic method. National Security and Military Sciences, 1(1), pp.128-132.
  10. Islamov, I., Akhundov, R., Dimitrov, D., & Panevski, V. (2025). Modeling of a Circular Disk Monopole Antenna Fed from a Microwave Broadband Coplanar Waveguide. Advanced Physical Research, 7(2), pp.184-195. <https://doi.org/10.62476/apr.72184>.

## DÖYÜŞ NƏQLİYYAT VASİTƏLƏRİNİN İDARƏETMƏ SİSTEMLƏRİNDƏ SÜNİ İNTELLEKTİN TƏTBİQİ

Hüseynov Ə.Q.

**Xülasə.** Süni intellektinin (Sİ) döyüş texnikası idarəetmə sistemlərinə integrasiyası müasir hərbi əməliyyatları inqilabi şəkildə dəyişir. Avtonom maşınlardan tutmuş təkmilləşdirilmiş komanda və idarəetmə sistemlərinə qədər Sİ, hərbi qüvvələrin döyüş texnikalarını idarə etmə və döyüş meydanında yerləşdirmə üsulunu dəyişdirir. Bu məqalə Sİ-nin döyüş texnikasının imkanlarını yaxşılaşdırmaqda, xüsusən avtonom naviqasiya, qərar qəbul etmə və geniş hərbi şəbəkələrlə integrasiya sahəsindəki rolunu araşdırır. Məqalə, Sİ-nin avtonom maşınlarla müəkkəb ərazilərdə hərəkət etməyə, real vaxtda qərar qəbul etməyə və hərbi əməliyyatların səmərəliliyini artırmağa necə imkan verdiyini müzakirə edir. Həmçinin, Sİ-nin komanda və idarəetmə sistemləri ilə integrasiyası, situasiya biliklərini, əlaqələndirməni və resurs bölgüsünü yaxşılaşdırır; bu da ortaya çıxan təhdidlərlə daha səmərəli və vaxtında mübarizə aparmağa kömək edir. Sİ-nin döyüş texnikası sistemlərindəki mövcud tətbiqlərini araşdırmaqla, məqalə daha çox avtonom sistemlərin və insan operatorları ilə Sİ texnologiyaları arasında artırılmış əməkdaşlığın potensialını vurğulayır. Hərbi əməliyyatlarda Sİ-nin gələcəyi, əməliyyat hazırlığını yaxşılaşdırmaq, şəxsi heyətə olan riskləri azaltmaq və strateji nəticələri optimallaşdırmaq vəd edir.

**Açar sözlər:** süni intellekt, döyüş texnikası, avtonom sistemlər, hərbi əməliyyatlar, komanda və idarəetmə, hərbi texnologiya



## AVIASIYA TƏHLÜKƏSİZLİYİNDƏ SÜNİ İNTELLEKTİN ROLU: MÖVCUD VƏZİYYƏT VƏ GƏLƏCƏK PERSPEKTİVLƏR



**Aliyev A.C.**

Azərbaycan Dövlət Aqrar Universiteti Publik Hüquqi Şəxs, Gəncə, Azərbaycan  
aslanaliyev804@gmail.com



**Əliyeva D.T.**

Azərbaycan Dövlət Aqrar Universiteti Publik Hüquqi Şəxs, Gəncə, Azərbaycan  
dinara.aliyeva.70@mail.ru



**Əliyeva T.S.**

Azərbaycan Dövlət Aqrar Universiteti Publik Hüquqi Şəxs, Gəncə, Azərbaycan  
eliyevaterane@gmail.com

**Xülasə.** Bu məqalə süni intellekt (Sİ) texnologiyalarının aviasiya təhlükəsizliyindəki hazırkı rolu, tətbiq sahələri və gələcək potensialı ilə bağlı əhatəli bir təhlil təqdim edir. Aviasiya sənayesi artan mürəkkəblik və daha yüksək təhlükəsizlik standartlarına olan tələblə üzləşdiyi bir dövrdə, Sİ innovativ və səmərəli həll yolları təklif edən transformativ bir qüvvə kimi ön plana çıxır. Məqalədə Sİ-nin mühüm rol oynadığı bir neçə əsas sahə araşdırılır, o cümlədən real vaxtli sensor məlumatlarından istifadə etməklə aparılan proqnozlaşdırıcı texniki qulluq, insan səhvlərini minimuma endirmək üçün pilotlar üçün qərar dəstək sistemləri və anomaliyanın aşkarlanması və təhdidlərin qarşısını alan alqoritmlər vasitəsilə inkişaf etmiş kibertəhlükəsizlik protokolları.

Bundan əlavə, tədqiqat avtonom pilotsuz uçuş aparatlarında (PUA) Sİ tətbiqlərini də araşdırır- xüsusilə naviqasiya, risklərin qarşısının alınması və uçuş avtomatlaşdırması sahələrində. ICAO kimi beynəlxalq təşkilatlar və Boeing, Airbus kimi sənaye liderləri artıq Sİ-ni əməliyyat təhlükəsizliyi strategiyalarına fəal şəkildə daxil ediblər. Bu irəliləyişlərə baxmayaraq, Sİ-nin integrasiyası bir sıra ciddi çağırışlar yaradır: hüquqi məsuliyyət, etik məsələlər, sistem etibarlılığı və kibertəhlükələrə qarşı qorunma kimi problemlər.

Məqalədə bu problemlər ətraflı şəkildə müzakirə olunur və gələcək istiqamətlər qeyd edilir - tam avtonom uçuş sistemlərinin inkişafı, real vaxtli risk analizi imkanları və kokpit mühitlərində insan-Sİ əməkdaşlığının təkmilləşdirilməsi modelləri kimi. Məqalə, həmçinin beynəlxalq əməkdaşlığa, tənzimləyici çərçivələrin formalaşdırılmasına və bu sahədə davamlı tədqiqatların aparılmasına olan təcili ehtiyacı vurğulayır.

Bu tədqiqat Sİ-dən istifadə etməklə uçuş təhlükəsizliyini artırmaq istəyən tədqiqatçılar, aviasiya mütəxəssisləri, siyasətçilər və texnologiya inkişaf etdiriciləri üçün dəyərli məlumatlar təqdim edir. Həm imkanları, həm də məhdudiyyətləri müəyyən etməklə, məqalə Sİ-nin aviasiya təhlükəsizliyinin gələcəyini necə məsuliyyətli və effektiv şəkildə formalaşdırma biləcəyini daha yaxşı anlamağa töhfə verir.

**Açar sözlər:** *süni intellekt, aviasiya təhlükəsizliyi, pilotsuz uçuş aparatları, texniki diaqnostika, kiber təhlükəsizlik, qərar dəstəyi sistemləri*

**Giriş.** Aviasiya sektoru dünya iqtisadiyyatının və beynəlxalq nəqliyyatın əsas sütunlarından biridir. Bu sahədə təhlükəsizlik məsələləri ən prioritet mövzudur, çünki hər hansı bir səhv və ya nasazlıq insan həyatına, böyük maddi ziyanə və beynəlxalq əlaqələrin pozulmasına səbəb ola bilər. Son illərdə texnologiyanın sürətli inkişafı ilə aviasiya təhlükəsizliyinin təminatı üçün yeni metod və vasitələr ortaya çıxmışdır. Bu vasitələr arasında süni intellekt (Sİ) texnologiyaları xüsusi yer tutur [1].

Süni intellekt maşınların insan zəkasına bənzər fəaliyyət göstərməsi və mürəkkəb qərarvermə proseslərini həyata keçirməsi deməkdir. Aviasiya təhlükəsizliyində Sİ-nin tətbiqi həm texniki, həm də idarəetmə aspektlərində inqilabi dəyişikliklərə səbəb olur. Məsələn, süni intellekt əsasında işləyən sistemlər uçuşların təhlükəsizlik risklərini proqnozlaşdırmaq, kiberhücumları aşkar etmək və pilotsuz uçuş aparatlarının təhlükəsizliyini təmin etmək kimi vəzifələri yerinə yetirir [3].

Hazırda beynəlxalq aviasiya təşkilatları və müxtəlif ölkələrin aviasiya sektorları süni intellekt texnologiyalarının tətbiqini sürətləndirirlər. Bu, həm uçuşların təhlükəsizliyini artırmaq, həm də insan faktoru ilə əlaqədar səhvləri minimuma endirmək məqsədi daşıyır. Bununla belə, süni intellektin aviasiyada tətbiqi ilə bağlı müəyyən çətinliklər də mövcuddur, məsələn, hüquqi məsuliyyət, etik normalar və texniki etibarlılıq məsələləri və s. [2].

**Metodlar.** Bu məqaləni yazmaqda məqsəd aviasiya təhlükəsizliyində süni intellektin mövcud vəziyyətini araşdırmaq, onun tətbiq sahələrini göstərmək və gələcək inkişaf perspektivlərini qiymətləndirməkdir. Məqalədə, həmçinin Sİ-nin tətbiqi ilə bağlı çağırışlar və risklərə də toxunulur. Bu mövzunun aktuallığı aviasiya sahəsində texnologiyanın sürətli inkişafı və təhlükəsizliyin təminatı baxımından mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Süni intellekt (Sİ) texnologiyaları aviasiya təhlükəsizliyi sahəsində son illərdə sürətlə tətbiq olunmağa başlanmışdır və bu proses getdikcə genişlənir. Dünyanın qabaqcıl aviasiya şirkətləri, tədqiqat institutları və beynəlxalq təşkilatlar Sİ-nin imkanlarından istifadə etməklə uçuş təhlükəsizliyinin təmin edilməsində yeni yanaşmalar inkişaf etdirirlər. Mövcud vəziyyətə baxdıqda, süni intellektin aviasiya sahəsində tətbiqi bir neçə əsas istiqamətdə fərqlənir [3]:

1. Uçuş məlumatlarının təhlili və proqnozlaşdırılması sahəsində Sİ geniş istifadə olunur. Təyyarələrin uçuş zamanı toplanan müxtəlif sensor məlumatlarının böyük həcmində analiz aparmaq insan üçün çox çətindir, lakin maşın öyrənməsi və data analizi texnologiyaları bu məlumatları real vaxtda təhlil edir, potensial riskləri əvvəlcədən aşkar edir və qəza hallarının qarşısını almağa kömək edir. Məsələn, General Electric və Boeing kimi şirkətlər Sİ əsasında diaqnostika sistemləri inkişaf etdirərək təyyarələrin mühərrik və digər sistemlərinin vəziyyətini davamlı izləyirlər.

2. Pilotların dəstəklənməsi və qərarvermə proseslərinin optimallaşdırılması sahəsində süni intellekt mühüm rol oynayır. Modern aviasiya sistemlərində pilotlar insan faktoru səbəbindən yaranan səhvləri minimuma endirmək üçün Sİ-nin təklif etdiyi qərar dəstəyi sistemlərindən istifadə edirlər. Bu sistemlər fəvqəladə hallar zamanı təcili tədbirlərin seçilməsində pilotlara kömək edir və insanın təzyiq altında səhv qərar vermə ehtimalını azaldır.

3. Kiber təhlükəsizlik sahəsində süni intellekt əsas element kimi qəbul edilir. Aviasiya infrastrukturunun kiberhücumlara məruz qalma riski getdikcə artır və bunun qarşısını almaq üçün Sİ-nin anomaliya aşkarlama və müdafiə sistemləri tətbiq olunur. Bu sistemlər şəbəkədə baş verən şübhəli fəaliyyətləri dərhal aşkar edir və təhlükəsizlik komandalarını xəbərdar edir, beləliklə, potensial hücumların qarşısını vaxtında almaq mümkün olur.

4. Süni intellekt pilotsuz uçuş aparatlarının (PUA) və avtonom idarəetmə sistemlərinin inkişafında əsas texnologiya kimi çıxış edir. PUA-ların uçuşlarının təhlükəsizliyi üçün Sİ əsasında

çalışan sensor və naviqasiya sistemləri insan müdaxiləsini minimuma endirir və beləliklə qəzaların qarşısını alır [4].

Hazırda bir çox beynəlxalq təşkilatlar, o cümlədən Beynəlxalq Mülki Aviasiya Təşkilatı (ICAO), süni intellektin aviasiyada tətbiqinə xüsusi diqqət yetirir. ICAO-nun 2022-ci ildə yaydığı hesabatda Sİ-nin potensial imkanları və tətbiq sahələri, həmçinin riskləri və təhlükəsizlik tələbləri ətraflı şəkildə qeyd olunmuşdur.

Azərbaycanın aviasiya sektoru da süni intellekt texnologiyalarının tətbiqinə maraq göstərir və bu istiqamətdə ilkin addımlar atılmaqdadır. Mövcud vəziyyətdə süni intellektin tətbiqi həm texnoloji, həm də təşkilati səviyyədə bir sıra çətinliklər ilə üzləşir. Bu çətinliklərə texniki etibarlılığın təmin olunması, sistemlərin kiberhücumlardan müdafiəsi, həmçinin hüquqi və etik məsələlər daxildir. Buna baxmayaraq, süni intellekt texnologiyalarının aviasiya təhlükəsizliyində rolu getdikcə artmaqda və yeni innovativ həllərin tətbiqi sürətlənməkdədir [4].

**Tətbiq sahələri.** Aviasiya təhlükəsizliyində süni intellektin tətbiq sahələri çoxşaxəlidir və bu sahədəki yeniliklər uçuşların etibarlılığını və təhlükəsizliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Süni intellekt müxtəlif texnologiyalar vasitəsilə aviasiyanın müxtəlif sahələrində effektiv həllər təklif edir. Bu bölmədə süni intellektin aviasiya təhlükəsizliyində əsas tətbiq sahələri:

1. *Texniki diaqnostika və proqnozlaşdırma;*
2. *Uçuşların idarə edilməsi və pilotların dəstəklənməsi;*
3. *Sərnişin təhlükəsizliyi və müşahidə sistemləri;*
4. *Kiber təhlükəsizlik;*
5. *Pilotsuz Uçuş Aparatları (PUA) və Avtonom İdarəetmə Sistemləri* [3].

Süni intellektin aviasiya təhlükəsizliyində rolu getdikcə artmaqda və bu sahədə yeni imkanlar yaranmaqdadır. Gələcəkdə süni intellektin tətbiqi aviasiya sektorunun bir çox aspektində inqilabi dəyişikliklərə səbəb olacaqdır. Lakin bununla yanaşı müəyyən çağırışlar da mövcuddur və bunlar aşağıdakılardır:

1. *Avtonom uçuş sistemlərinin inkişafı;*
2. *Reaktiv təhlükəsizlik sistemləri və real vaxtlı analitika;*
3. *İnsan-maşın əməkdaşlığının təkmilləşdirilməsi;*
4. *Hüquqi və etik məsələlər;*
5. *Kiber təhlükəsizlik çağırışları;*
6. *Texnoloji innovasiyalar və tədqiqatlar* [5].

**Nəticə.** Aviasiya təhlükəsizliyində süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi həm mövcud dövrdə, həm də gələcəkdə sektorda inqilabi dəyişikliklərə səbəb olacaq. Bu texnologiyalar uçuşların təhlükəsizliyini artırmaq, insan faktoru ilə bağlı riskləri minimuma endirmək, kiberhücumlara qarşı effektiv müdafiə yaratmaq və avtonom idarəetmə sistemlərini təkmilləşdirmək üçün geniş imkanlar təqdim edir. Mövcud vəziyyət göstərir ki, bir çox beynəlxalq aviasiya şirkətləri və təşkilatlar süni intellektdən uğurla istifadə edir, lakin bununla yanaşı texniki, hüquqi və etik problemlər hələ tam həllini tapmayıb. Süni intellektin tətbiqində qarşıya çıxan çağırışların öhdəsindən gəlmək üçün innovativ yanaşmalar və beynəlxalq əməkdaşlıq vacibdir [4].

Gələcəkdə süni intellekt əsasında avtonom uçuş sistemlərinin daha geniş tətbiqi və real vaxtlı təhlükəsizlik monitorinqi aviasiyada yeni standartların formalaşmasına şərait yaradacaq. İnsan-maşın əməkdaşlığının təkmilləşdirilməsi pilotların iş yükünü azaltmaqla yanaşı, təhlükəsizliyin yeni səviyyəsinə nail olmağa imkan verəcək. Bununla belə, hüquqi məsuliyyət və etik normaların formalaşdırılması, eləcə də kiber təhlükəsizliyin gücləndirilməsi sahəsində ciddi işlər aparılmalıdır [5].

Ümumiyyətlə, aviasiya təhlükəsizliyində süni intellekt texnologiyalarının inkişafı həm texnoloji, həm də təşkilati baxımdan müasir çağırışlara cavab verən effektiv həllər yaratmaq

potensialına malikdir. Bu sahədə davamlı tədqiqatlar, yeni texnologiyaların tətbiqi və standartların hazırlanması gələcəkdə aviasiyanın təhlükəsizliyinin təmin olunmasında əsas amil olacaqdır.

**Təkliflər.** Süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi üçün milli strategiya hazırlanmalı, pilotlar və texniki heyət üçün Sİ ilə bağlı ixtisasartırma proqramları təşkil edilməli, hüquqi və etik çərçivələr müəyyənləşdirilməli və beynəlxalq təcrübəyə əsaslanmalı, PUA-ların idarəsi üçün etibarlı və təhlükəsiz Sİ sistemləri inkişaf etdirilməlidir.

### Ədəbiyyat

1. Əliyev, A. (2022). Süni intellekt. Bakı: Altun.
2. Əliyeva, K. (2024). Süni intellekt (Dərs vəsaiti). Bakı: ADNSU.
3. Aviasiya Təhlükəsizliyi Jurnalı. (2024). *Aviasiya təhlükəsizliyində süni intellektin tətbiqi: Sisteməlik nəzərdən keçirmə və bibliometrik analiz*.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s44196-024-00671-w>
4. Beynəlxalq Mülki Aviasiya Təşkilatı (ICAO). (2025). *Süni intellektin aviasiyada tətbiqi: Hazırkı vəziyyət və gələcək perspektivlər*. ICAO.  
[https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp\\_489\\_en.pdf](https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp_489_en.pdf)
5. Rzayeva G, İbrahimova A. (2021). Süni intellekt, insan hüquqları və fərdi məlumatların təhlükəsizliyi. (Dərs vəsaiti). Bakı: "Nurlar" nəşriyyatı

## THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AVIATION SAFETY: CURRENT TRENDS AND FUTURE PROSPECTS

Aliyev A.C., Aliyeva D.T, Aliyeva T.S.

**Abstract.** This article explores the role of artificial intelligence (AI) in aviation safety, focusing on the current state of its application and future prospects. AI technologies have rapidly become integral to the aviation industry, providing innovative solutions for enhancing flight safety, reducing human errors, and improving cybersecurity. The paper analyzes various AI applications, including predictive maintenance, pilot support systems, anomaly detection in airport security, and autonomous flight operations. It also discusses the challenges related to legal responsibility, ethical standards, and technical reliability. The future perspectives emphasize the expansion of autonomous flight systems, real-time risk assessment, and improved human-machine collaboration. The article highlights the necessity of ongoing research and international cooperation to overcome emerging risks and fully leverage AI's potential in aviation safety. This study provides valuable insights for researchers, practitioners, and policymakers interested in the integration of AI in civil aviation security.

This article provides a comprehensive analysis of the current role, application areas, and future potential of artificial intelligence (AI) technologies in aviation safety. As the aviation industry faces growing complexity and demand for higher safety standards, AI has emerged as a transformative force offering innovative and efficient solutions. The paper examines several key areas where AI plays a critical role, including predictive maintenance using real-time sensor data, decision-support systems for pilots to minimize human error, and advanced cybersecurity protocols through anomaly detection and threat prevention algorithms.

Furthermore, the study explores AI applications in autonomous unmanned aerial vehicles (UAVs), focusing on navigation, risk avoidance, and flight automation. International organizations such as ICAO and industry leaders like Boeing and Airbus have actively incorporated AI into their operational safety strategies. Despite these advancements, the

integration of AI poses notable challenges, including legal accountability, ethical dilemmas, system reliability, and protection against cyber threats.

The article discusses these challenges in detail and outlines future directions, such as the development of fully autonomous flight systems, real-time risk analysis capabilities, and improved human-AI collaboration models in cockpit environments. It emphasizes the urgent need for international cooperation, regulatory frameworks, and continued research to address the complexities surrounding AI in aviation.

This study offers valuable insights for researchers, aviation professionals, policy-makers, and technology developers interested in leveraging AI to enhance flight safety. By identifying both opportunities and limitations, the article contributes to a better understanding of how AI can shape the future of aviation safety in a responsible and effective manner.

**Keywords:** artificial intelligence, aviation safety, unmanned aerial vehicles, technical diagnostics, cybersecurity, decision support systems



## SÜNİ İNTELLEKTİN TƏTBİQİNİN MÜASİR PROBLEMLƏRİ: SOSIAL ƏDALƏT VƏ HÜQUQİ CAVABDEHLİK



**Qurbanova T.Q.**

Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti, Bakı, Azərbaycan  
turkan.qurbanova@adpu.edu.az

**Xülasə.** Məlumdur ki artıq bütövlükdə həyatımızı müasir texnologiyalarsız təsəvvür etmək mümkün deyil. Ona görə də XXI əsrin “müasir texnologiyalar dövrü” adlandırılması heç də təsadüfi deyildir. Hazırkı İnformasiya cəmiyyətini isə süni intellekt olmadan təsəvvür edə bilmərik. Müasir dövrümüzdə süni intellekt insan kimi düşünə bilən və qərar qəbul edə bilən texniki qurğuların yaradılmasını həmçinin insan məntiqinin maşınlarda tətbiqini nəzərdə tutur. Eləcə də süni intellekt insanların psixologiyasını düşüncə tərzini, real intellektini modelləşdirən və reallaşdırılan süni formada yaradılmış sistemdir. Süni intellektin yaranmasının əsas məqsədi əvvəllər ənənəvi olaraq insanlar tərəfindən həll olunan məsələlərin maşınlar tərəfindən həll olunmasını təmin etmək olmuşdur. Qeyd etmək lazımdır ki bu problem bəşəriyyət qarşısında duran mürəkkəb elmi-praktik problemlərdən biridir.

**Açar sözlər:** hüquqpozmalar, süni intellekt, insan hüquqları, kibermüdaxilə, sosial məsuliyyət

**Giriş.** Son illərdə süni intellekt cəmiyyətin bir sıra sahəsinə o cümlədən, təhsil, səhiyyə, hüquq, texnologiya, hətta incəsənətə qədər nüfuz etmişdir. Bu əhəmiyyətli dərəcədə sürətli və geniş yayılma az qala həyatımızın vacib elementinə çevrilmiş proses yeni imkanlarla, vasitələrlə yanaşı həmçinin, ciddi etik, sosial və hüquqi problemləri də gündəmə gətirir. Onu da qeyd etmək lazımdır ki, hazırkı dövrümüzdə süni intellektin insanla rəqabətə girməsi məsələsi də bu mövzunun aktuallığını bir daha subut edir. Eləcə də yuxarıda qeyd edilənlərin necə tənzimlənməsi məsələsi də fəlsəfi və elmi baxış tələb edir. Bu səbəbdən mövzu həm praktik həm teorik baxımdan araşdırılması aktual olan bir sahədir.

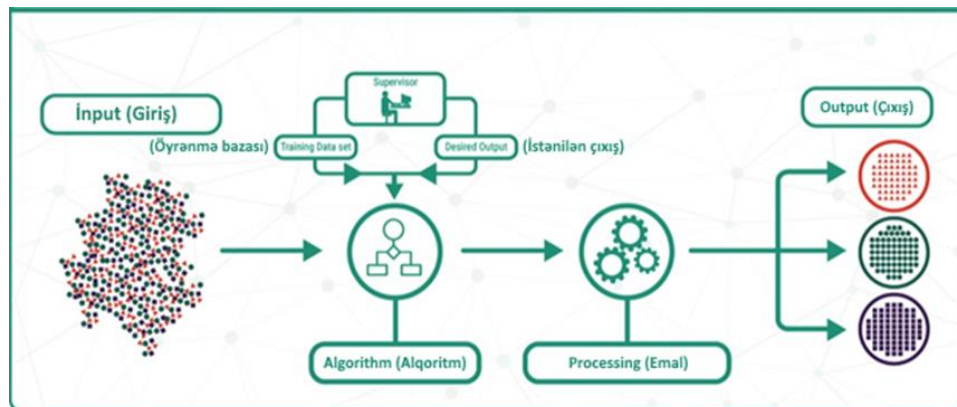
Hazırda yaşadığımız XXI əsr “texnologiyalar dövrü” adlandıran tədqiqatçıların fikirlərini doğru hesab edirik. Çünki hal-hazırda insan həyatını texnologiyalarsız təsəvvür etmək qətiyyəən mümkün deyildir. Qeyd etməyi zəruri hesab edirik ki, İnformasiya cəmiyyətinin inkişafını yeni müasir texnologiyalar olmadan təsəvvür edə bilmərik. Xüsusilə də burada süni intellekt sistemlərini nümunə göstərmək yerinə düşərdi. Dünya şöhrətli populyar nətiq və biznes və texnologiyaya təsir edən 18 ən çox satılan kitabın müəllifi Bernard Marr öz kitabında dünyanı əsaslı dəyişə biləcək 9 texnoloji meqatrendin adını sadalamışdır. Həmçinin bu sadalanan texnoloji meqatrendlərdən dördüncüsü “Süni intellekt sistemlərinin sürətli inkişafı” adlanır. Bu anlayış ilk dəfə 1956-cı ildə Rockefeller İnstitutu tərəfindən maliyyələşdirilən Dartmouth Kollecinə konfransda Con Makkarti tərəfindən işlədilib təqdim edilmişdir. O, bu termini Alan Türiq tərəfindən verilmiş kompüter intellekti anlayışı əsasında irəli sürmüşdür. Artıq Süni intellekt o dərəcədə inkişaf etmişdir ki, süni intellektlə bağlı hətta elmi-tədqiqat mərkəzləri də fəaliyyətə başlamışdır. Belə ki, “Google” şirkətinin Nyu-Yorkda, Torontoda, Londonda və İsveçrədə süni intellektlə bağlı elmi-tədqiqat mərkəzləri fəaliyyət göstərir. Beşinci süni intellekt elmi-tədqiqat mərkəzi isə Pekində fəaliyyətə başlamışdır.

Onu da xüsusilə qeyd etmək mühümdür ki Süni intellekt insan kimi düşünən və qərar qəbul edə bilən texniki qurğuların yaradılmasını, insan məntiqinin maşınlarda tətbiqini nəzərdə tutur.

Həmçinin süni intellekt insanların düşüncə tərzini psixologiyasını, intellektini modelləşdirən və müasir dövrdə reallaşdırılan süni yaradılmış sistemdir. Süni intellektin yaranmasının əsas məqsədi əvvəllər ənənəvi olaraq insanlar tərəfindən həll olunan məsələlərin maşınlar tərəfindən həll olunmasını təmin etmək olmuşdur və bu problem bəşəriyyət qarşısında duran mürəkkəb elmi-praktik problemlərdən biridir [1].

Süni intellekt proqram təminatı həllərinin yeni nəslini müəyyənləşdirir. Süni intellekt, insan zəkasının və hisslərinin xüsusiyyətlərini simulyasiya etməyə çalışan bir sistemdir. Bu sahə riyaziyyat kompüter elmləri, biologiya, psixologiya, və mühəndislik kimi fənlərə əsaslanır. Bunlara öyrənmə, düşünmə və uyğunlaşma daxildir. Bəs “öyrənmə” prosesi necə baş verir? Maşın öyrənmə (machine learning) kompüterə məlumatları “öyrənmək” bacarığı vermək üçün statistik metodlardan istifadə edən süni intellekt sahəsidir. Maşın öyrənmə adı ilk dəfə 1959-cu ildə Artur Samuel tərəfindən istifadə olunmuşdur. Maşın öyrənmənin bir neçə öyrənmə sahələri vardır [1].

Nəzarət edilə bilən öyrənmə həm giriş, həm də çıxış parametrlərinin verildiyi bir maşın öyrənmə sahəsidir. Sadə dildə desək sistemə öyrənmək üçün giriş (X) və müvafiq çıxış (Y) məlumatları verilir (Şəkil 1). Məsələn, sərnişin və yük avtomobillərinin analizi nəzərdə tutulubsa, sistemi öncədən sərnişin və yük avtomobilləri kimi təsnif edilən şəkillər bazası ilə təchiz etmək lazımdır. Sistemin müvafiq algoritmi öncədən təsnif edilmiş şəkillər üzərində müşahidə aparıb onların fərqləndirilməsini öyrəndikdən sonra, təsnif edilməmiş şəkilləri tanımağa başlayır. Sistem nə qədər çox təsnif edilmiş şəkillər toplusu ilə təmin olunarsa, onun tanıma xüsusiyyəti bir o qədər dəqiq olacaqdır. Tanıma dəqiqliyi yalnız 85%-ə çatan sistem, yaxşı öyrədilmiş hesab edilə bilər. Nəzarət edilə bilən öyrənmə reqressiya və təsnifat problemlərinin həllində istifadə edilir.

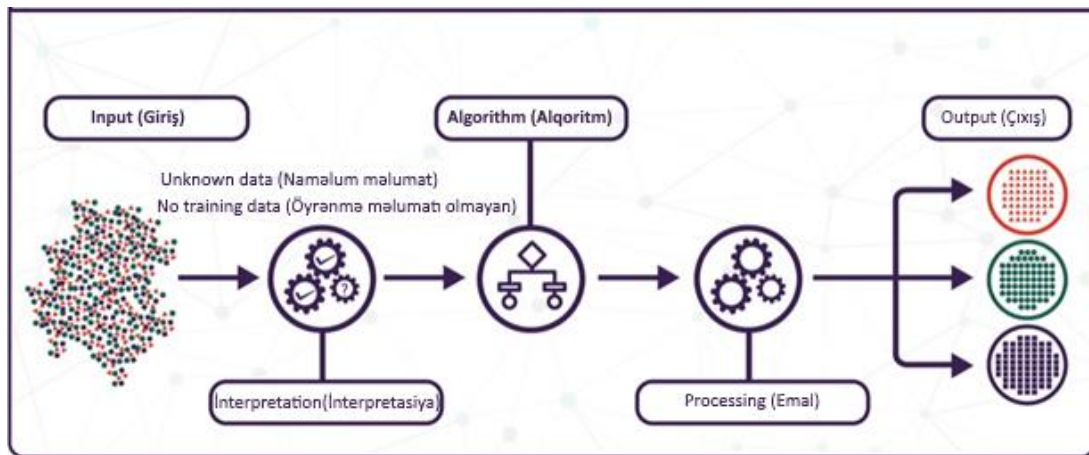


**Şəkil 1.** Nəzarət edilə bilən öyrənmə modelinin işləmə prinsipi

Nəzarət edilə bilinməyən öyrənmə öncədən təsnif edilməmiş və ya giriş və çıxış parametrləri bilinməyən test məlumatlarını öyrənən maşın öyrənmə sahəsidir. Sadə dildə desək sistemə öyrənmək üçün ancaq giriş məlumatları (X) verilir və müvafiq çıxış məlumatları verilmir (Şəkil 2-dən görüldüyü kimi). Nəzarət edilə bilinməyən öyrənmə, test məlumatlarını, xüsusi hazırlanmış alqoritm vasitəsi ilə, ümumi xüsusiyyətlərini öyrənməklə və daxil olan yeni məlumatlarda həmin oxşarlığın olub-olmamasını yoxlamaqla müəyyən edir. (Şəkil 1-dən görüldüyü kimi) Nəzarət edilə bilinməyən öyrənmə üsulu daha çox kompleks məsələlərin həllində istifadə olunur. Günümüzdə aktiv istifadə edilməyə başlanan çatbotlar (chatbot), özünü idarə edən avtomobillər (self-driving cars), üz tanıma proqramları (face recognition programs), ekspert sistemləri və robotlar nəzarət edilə bilən və nəzarət edilə bilinməyən öyrənmə metodlarının hər birini ayrı-ayrılıqda və ya birlikdə istifadə edir.

Süni intellektin bir sıra növləri vardır və onlar aşağıdakı formada fərqləndirilir:

- Geniş və ya güclü;
- Məhdud və ya zəif.



*Şəkil 2. Nəzarət edilə bilməyən öyrənmə modelinin işləmə prinsipi*

Süni intellektin müxtəlif növləri ilə bağlı araşdırma aparan tədqiqatçılar tərəfindən bir sıra fikirlər və yanaşmalar mövcuddur. Digər bir yanaşmaya əsasən Miçiqan Dövlət Universitetinin İntegrativ Biologiya və Kompüter Elmləri və Mühəndisliyi dosenti olan Arend Hintzeyə məxsusdur [2].

O, süni intellektin 4 növünü fərqləndirir:

1. Məhdudlaşdırılmış süni intellekt. Bu tip intellekt sizi, məsələn, şahmatda uda bilər. Amma ona “torpağı yemək olarmı?” sualını versəniz, cavab ala bilməzsiniz;
2. Ümumi süni intellekt. Bu növ insan intellektinə maksimum yaxındır. O, məlumatları təhlil edir, digər maşınlarla ünsiyyətə girir, özünü təlimdən keçirir;
3. Süni super intellekt. Bu intellekt növü o qədər inkişaf edib ki, insan intellektindən fərqlənir. Başqa sözlə, bizim intellektimiz həmin super intellektin motivlərini anlamaq üçün yetərinə inkişaf etmiş deyil.
4. Özünüdərkə malik süni intellekt. Bu tip süni intellektin ən yüksək səviyyəsidir. Hazırda mövcud deyil bu gələcəyin nəzəri mərhələsidir

Müasir dövrümüzdə süni intellekt müasir texnoloji innovasiyanın və elmin ən böyük və mühüm nailiyyətlərindən biri hesab olunur. Lakin bununla yanaşı qeyd etmək lazımdır ki bu sistem bir çox çatışmazlıqlardan sığortalanmayıb. Eyni zamanda bu sistemin fayda və üstünlüklərini də qeyd etmək yerinə düşərdi. Bu üstünlükləri aşağıdakı kimi qruplaşdırmaq olar:

- Enerji sərfini minimuma endirmək
- Dünya bazarında daha sürətli integrasiya və rəqabət gücünü artırmaq
- Peşəkar sistemlər yaratmaq;
- İstehsal və digər fəaliyyət sahələrində məhsuldarlığı artırmaq;
- İstehsal və fəaliyyətin realizə olunması üçün çəkilən digər xərcləri azaltmaq;
- İnsanların asudə vaxtını artırma imkanını yaratmaq və s.

Günümüzdə insan fəaliyyətinin, yəni canlı əmək qüvvəsinin tətbiq olunduğu bir çox sahələrdə süni intellektin tətbiqinə keçilməsi daha peşəkar bir sistem formalaşdırmaq, faydalı iş əmsalını artırmaq, xətalara minimuma endirmək məqsədinə xidmət edir. Sənayedə tətbiq etməklə fasiləsiz istehsalatı təmin etmək, məhsuldarlığı artırmaq, daha az istehsal xərci ilə daha çox məhsul istehsal etmək əsas və vacib bir hədəf kimi müəyyən edilmişdir. Süni intellektdən danışarkən onun tətbiqi nəticəsində canlı əmək qüvvəsi ixtisar olunmaqla daha az əmək haqqı fondu formalaşacaq, daha peşəkar işçilərə daha çox əmək haqqı ödəmək imkanı yaranacaq, itkilər minimuma enəcək, faydalı iş əmsalı yüksələcək. Süni intellektin sürətli inkişafı ilə insan fəaliyyətinin bir çox sahəsində artıq süni intellekt sistemləri fəaliyyət göstərməkdədir və bunun nəticəsində canlı əmək qüvvəsinə daha az ehtiyac yaranır ki, bu da insanların öz şəxsi inkişaflarına daha çox vaxt ayırmalarına imkan verir.

Bütün qeyd edilənlərlə yanaşı, süni intellektin istehsalat, xidmət sektorları və bu və ya digər sahələrdə tətbiq edilməsi canlı əmək qüvvəsi olan insanların əməyindən istifadənin aktuallığını və zəruriliyini də minimuma endirir. Bu isə ştat vahidlərinin ixtisarı ilə insanların kütləvi şəkildə işsizliyinə səbəb olmaqdadır [2].

Süni intellekt sistemlərinin ən böyük çatışmazlıqlarından biri hüquqpozmalara, hüquqi məsuliyyət və hüquqi tənzimləmə problemləridir. Belə ki, süni intellektin nailiyyətlərindən müxtəlif sahələrdə tətbiq edilməsi yeni hüquqi tənzimləmə sisteminin də formalaşmasını zəruri edir. Bunun üçün görülməli əsas tədbirlərdən biri hüquq normalarının daha da təkmilləşdirilməsidir. Süni intellekt sistemlərinin törətdiyi hüquqpozmalara görə məsuliyyət məsələlərində digər bir yanaşma kimi Mülki Məcəllənin müvafiq maddəsində əks olunanlardır. Belə ki, həmin maddədə “Yüksək təhlükə mənbəyi olan fəaliyyətin vurduğu zərərə görə məsuliyyət” məsələləri öz əksini tapmışdır. Süni intellekti yüksək təhlükə mənbəyi hesab etsək onun mülkiyyətçisi və ya ona başqa cür sahiblik edən şəxs təqsiri olmadıqda belə məsuliyyət daşıya bilər. Buradan belə bir sual ortaya çıxır ki, süni intellekti yüksək təhlükə mənbəyi saymaq olarmı?

Onu da xüsusi ilə qeyd etmək lazımdır ki yüksək təhlükə mənbəyi ilə bağlı iki nəzəriyyə mövcuddur: Obyekt nəzəriyyəsi və fəaliyyət nəzəriyyəsi. Obyekt nəzəriyyəsinə görə, yüksək təhlükə mənbəyi fiziki dünyanın hər hansı şəxs tərəfindən tamamilə idarə və nəzarət edilə bilməyən obyektidir. Fəaliyyət nəzəriyyəsi isə ətrafdakılar üçün yüksək təhlükənin mənbəyi kimi müəyyən növ fəaliyyətləri əsas götürür. Deməli hər iki nəzəriyyə müəyyən obyektlərin və onların fəaliyyətinin insanlar üçün yüksək təhlükə yaratmasınəhtiva edir. Qeyd etmək lazımdır ki, hal-hazırda süni intellekt hüquq subyekti olaraq tanınmır və buna görə də süni intellektin səbəb olduğu zərərə görə məsuliyyətə cəlb edilməsi qeyri-mümkündür. Buradan belə aydın olur ki, biz süni intellekti nə fiziki şəxs, nə də hüquqi şəxs hesab edə bilmərik. Çünki Azərbaycan Respublikası Mülki Məcəlləsinin 24-cü maddəsinə əsasən fiziki şəxs hüquq münasibətlərində öz adından iştirak edən insan fərdidir. Hüquqi şəxs isə 43-cü maddədən göründüyü kimi qanunla müəyyənləşdirilən qaydada dövlət qeydiyyatından keçmiş, xüsusi yaradılmış bir qurumdur və bu qurum bir çox hüquqlara malikdir. Müxtəlif ədəbiyyatlarda süni intellekt üçün qanunvericiliyə fiziki və hüquqi şəxslərlə yanaşı üçüncü bir kateqoriya kimi elektron şəxs (Electronic personhood) anlayışının daxil edilməsi müzakirə olunur, lakin bunun reallaşacağı hələ ki qeyri-mümkündür [3].

Yekun olaraq qeyd etmək zəruridir ki, süni intellektlə bağlı məsələlərin tam olaraq nə beynəlxalq, nə də milli qanunvericilikdə tənzimlənməməsi bir çox hallarda bir sıra məsələlərin həllində çoxsaylı problemlər yaradır. Məsələn, məsuliyyət və s. hallarda. Bütün bu kimi problemlər aradan qaldırıldıqdan sonra süni intellekt daha yaxşı və üstün intellektual sistemə çevrilə biləcəkdir. Amma unutmamaq olmur ki, ən yaxşı və ən üstün intellektual sistem süni intellektin belə özünü yaratmış olan məhz insandır.

**Metodlar.** Məqalənin təhlilində empirik analitik və müqayisəli metodlara istinad edilmişdir. Əsas məqsəd süni intellektin sosial və hüquqi problemlərini araşdırmaq ictimai münasibətləri öyrənmək və real nümunələr əsasında təhlil aparmaq olmuşdur.

**Nəticə və müzakirələr.** Mövzu hüquq, təhsil, iqtisadiyyat sahələrinin kəsişməsində yerləşir. Bu da onun elmi və praktik əhəmiyyətini aktuallaşdırır. Məqalədə süni intellektin necə daha məsuliyyətli təhlükəsiz şəkildə tətbiq edilməsini göstərən bir sıra nüanslar verilmişdir. Həmçinin elmi baxımdan informasiya cəmiyyətinin çağırışlarını dərk etməyə, praktik baxımdan isə texnologiyanın faydalı və zərərsiz istifadəsini təmin etməyə xidmət edir.

### Ədəbiyyat

1. Rzayeva, G., & İbrahimova, A. (2021). Süni intellekt, insan hüquqları və fərdi məlumatların təhlükəsizliyi: Dərs vəsaiti. Bakı: Nurlar Nəşriyyatı.

2. Məmmədzaadə, İ. (2020, May 15). Süni intellekt və mülki hüquqi məsuliyyət. Politicon. <https://politicon.co/az/essays/29/artificial-intelligence-and-civil-legal-responsibility>
3. TechTarget. (2025). Unsupervised learning. <https://whatistechtarget.com/definition/unsupervised-learning>

### MODERN CHALLENGES OF APPLYING ARTIFICIAL INTELLIGENCE: SOCIAL JUSTICE AND LEGAL ACCUNTABILITY

Gurbanova T.G.

**Abstract.** *It is known that it is no longer possible to imagine our life without modern technologies. Therefore, it is not by chance that the 21st century is called the “age of modern technologies”. We cannot imagine the current Information Society without artificial intelligence. In our modern era, artificial intelligence involves the creation of technical devices that can think and make decisions like humans, as well as the application of human logic in machines. Also, artificial intelligence is an artificially created system that models and realizes the psychology, thinking style, and real intelligence of people. The main goal of the creation of artificial intelligence was to ensure that problems that were previously traditionally solved by people can be solved by machines. It should be noted that this problem is one of the complex scientific and practical problems facing humanity.*

**Keywords:** *crimes, artificial intelligence, human rights, cyber-interference, social responsibility*



## İNNOVASIYA VƏ RƏQABƏT: SÜNİ İNTELLEKTİN YENİ İQTİSADI FORMASIYALAR YARADILMASI ÜSULLARI



**Qadirova G.T.**

Bakı Turizm Peşə Məktəbi, Bakı, Azərbaycan  
gulnar93baku@gmail.com

**Xülasə.** Süni intellektin müxtəlif sektorlara integrasiyası texnoloji dəyişikliyi və sənayelərin necə fəaliyyət göstərdiyini və rəqabət aparacağını yenidən müəyyənləşdirməyi vəd edən transformasiyaedici iqtisadi gücü təmsil edir. Süni intellektin bu təkamülü sadəcə avtomatlaşdırmadan kənara çıxaraq, əmək bazarları, təhsil sistemləri və global ticarət dinamikası kimi iqtisadi inkişafın geniş aspektlərinə təsir göstərir. Süni intellektin məhsuldarlığı artırmaq və innovasiyaları təşviq etmək potensialı iqtisadi genişlənmə üçün yeni yollar açır və rəqabətqabiliyyətlik və bərabərsizliklə bağlı mühüm mülahizələri gündəmə gətirir. Süni intellekt texnologiyaları inkişaf etdikcə, onlar bütün dünyada iqtisadi strukturlar daxilində getdikcə daha mürəkkəb qarşılıqlı əlaqə qurur və bu dəyişiklikləri anlamağa və onlardan istifadə etməyə çalışan alimlərin, siyasətçilərin və sənaye liderlərinin diqqətini cəlb edir.

**Açar sözlər:** iqtisadiyyat, süni intellekt, inkişaf, istehsal

**Giriş.** Süni innovasiya ilə iqtisadi artım arasındakı əlaqə bir neçə nəzəri əsaslara əsaslanan dinamik və inkişaf edən tədqiqat sahəsidir. Bu nəzəriyyələrin qarşılıqlı əlaqəsini başa düşmək süni innovasiyanın texnoloji yenilik kimi global iqtisadiyyatlarda iqtisadi inkişafa və transformasiyaya necə təkan verə biləcəyini aydınlaşdırmağa kömək edir. Süni intellekt nə qədər tez və daha geniş tətbiq edilərsə, onun iqtisadi məhsuldarlığa və artıma təsiri bir o qədər çox olar. Süni intellekt innovasiyalarının iqtisadi artıma əhəmiyyətli müsbət təsirini vurğulayan bu araşdırmanın nəticələrinə əsasən, investorlar, biznes menecerləri və dövlət qurumları da daxil olmaqla müxtəlif maraqlı tərəflər üçün konkret tövsiyələr verilə bilər. Bu tövsiyələr süni intellekt texnologiyalarının strateji tətbiqi yolu ilə iqtisadi nəticələri artırmaq və davamlı artımı dəstəkləmək üçün tədqiqatın nəticələrindən istifadə etmək məqsədi daşıyır. Investorlar süni intellekt innovasiyaları və onun tətbiqləri sahəsində ön planda olan sektorlara ayırmalarını artırmağı düşünməlidirlər. Tədqiqat göstərir ki, süni intellektə diqqət yetirən texnoloji startaplar və süni intellekti öz əməliyyatlarına integrasiya edən qurulmuş şirkətlər kimi yüksək süni intellekt fəaliyyəti olan sahələr, ehtimal ki, məhsuldarlığın və artımın artması ilə qarşılaşacaq. Beləliklə, investorlar investisiyalarını yalnız süni intellekt texnologiyalarını inkişaf etdirən deyil, həm də əməliyyatları optimallaşdırmaq, müştəri təcrübəsini artırmaq və yeni məhsul və xidmətlər yaratmaq üçün süni intellekt tətbiq edən şirkətlərə yönəltməkdən faydalana bilər. Müxtəlif sənaye sahələri üzrə biznes menecerləri səmərəliliyi artırmaq və innovasiyaları təşviq etmək üçün süni intellekt texnologiyalarını qəbul etməyi düşünməlidirlər [1]. Tədqiqat göstərir ki, süni intellekt məhsuldarlığı artırmaq və innovasiyaları təşviq etməklə iqtisadi artıma əhəmiyyətli dərəcədə töhfə verir. Menecerlər avtomatlaşdırma, məlumat analitikası və müştərilərin cəlb edilməsi kimi sahələrə diqqət yetirərək, süni intellektdən istifadə edərək optimallaşdırıla bilən prosesləri müəyyən etmək üçün cari əməliyyatlarını qiymətləndirməlidirlər. Təlim proqramları həmçinin işçilərin süni intellekt vasitələrindən səmərəli istifadə etməyə imkan verən və bununla da işçi qüvvəsinin bacarıqlarını yeni texnoloji irəliləyişlərlə uyğunlaşdırmaq üçün bacarıqların artırılması üçün həyata keçirilməlidir. Hökumət qurumları və

siyasətçilər süni intellektin tədqiqatı və inkişafı üçün əlverişli mühitin yaradılmasına diqqət yetirməlidirlər. Bura süni intellektə aid olan bacarıqları təşviq edən təhsil proqramlarına sərmayə qoyuluşu, qrantlar və subsidiyalar vasitəsilə elmi-tədqiqat və təkmilləşdirmə fəaliyyətlərinin dəstəklənməsi və ictimai maraqları qoruyarkən tənzimləyici çərçivələrin innovasiyaya şərait yaratmasının təmin edilməsi daxildir. Tədqiqat göstərir ki, süni intellekt üzrə milli strategiyalar xüsusilə inkişaf etmiş iqtisadiyyatlarda iqtisadi artıma əhəmiyyətli dərəcədə müsbət təsir göstərir. Beləliklə, hərtərəfli süni intellekt strategiyalarının hazırlanması milli inkişaf üçün süni intellektin faydalarından istifadə etməyi hədəfləyən hökumətlər üçün prioritet olmalıdır.

Süni intellekt iqtisadi əməliyyatlara və sənaye strukturlarına dərin təsir göstərir. Birincisi, süni intellekt istehsalın səmərəliliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır və avtomatlaşdırma və intellektləşdirmə vasitəsilə əməliyyat xərclərini azaldır, ənənəvi sənayelərin transformasiyasına və təkmilləşdirilməsinə təkan verir. Məsələn, istehsal sektorunda ağıllı robotlar və avtomatlaşdırılmış istehsal xətləri nəinki istehsalın səmərəliliyini artırır, həm də resursların bölüşdürülməsini optimallaşdırır və əmək xərclərini azaldır. İkincisi, süni intellekt texnologiyası böyük məlumatların analitikası, bulud hesablamaları və intellektual xidmətlər kimi inkişaf etməkdə olan sənayelərin inkişafına təkan verir. Bu yeni sənayelər təkcə çoxsaylı məşğulluq imkanları yaratmır, həm də iqtisadi strukturun optimallaşdırılmasına və təkmilləşdirilməsinə kömək edir. İqtisadi tədqiqatlar sahəsində süni intellektin tətbiqi iqtisadi nəzəriyyələrə və empirik metodlara inqilabi dəyişikliklər gətirir. Ənənəvi iqtisadi tədqiqatlar klassik ekonometrik modellərə və məhdud məlumat mənbələrinə əsaslanır, süni intellekt texnologiyaları isə maşın öyrənməsi və böyük verilənlərin analitikası vasitəsilə daha zəngin və müxtəlif məlumat mənbələri və analitik alətlər təqdim edir. Bu, iqtisadçılara mürəkkəb iqtisadi hadisələri daha dəqiq başa düşmək və proqnozlaşdırmaq imkanı verir. Bundan əlavə, süni intellekt texnologiyasının tətbiqi iqtisadi nəzəriyyələrin innovasiyasına təkan verir, yeni nəzəriyyələrin formalaşmasına və mövcud olanların təkmilləşdirilməsinə kömək edir və bununla da iqtisadi tədqiqatların dərinliyini və genişliyini artırır. Süni intellekt sahəsindəki sürətli irəliləyişlər bütövlükdə iqtisadiyyata, eləcə də cəmiyyətə dərin təsir göstərir. Bu yeniliklər məhsuldarlıq, məşğulluq və rəqabət üçün mühüm təsirlərlə geniş çeşiddə məhsul və xidmətlərin həm istehsalına, həm də xüsusiyyətlərinə birbaşa təsir etmək potensialına malikdir. Lakin, bu təsirlər nə qədər əhəmiyyətli olsa da, süni intellekt eyni dərəcədə dərin ola bilən və zaman keçdikcə birbaşa təsirə hakim ola biləcək nəticələrlə innovasiya prosesinin özünü dəyişdirmək potensialına malikdir. Süni intellektdən istifadə halları bir neçə sənayeni əhatə edir. Ən çox yayılmış istifadə hallarına marketinq, satış, müştəri xidmətləri, həmçinin məzmunun yaradılması daxildir. Bütün sənayelərdə üfüqi olaraq tətbiq olunan funksiyalara mətn, video və s., marketinq tapşırıqlarının avtomatlaşdırılması və chatbotlar daxildir. Bununla belə, bəzi digər funksiyalar daha çox sənaye xarakteri daşıyır.

- Nəqliyyatda süni intellektin əsas istifadə sahələrinə özünü idarə edən avtomobillər, sensor texnologiyası və trafikın proqnozlaşdırılması daxildir. Özünü idarə edən avtomobillər heç bir insan müdaxiləsi olmadan obyektləri aşkar edir, qərarlar qəbul edir və yollarda hərəkət edir. Analitikaya əsaslanaraq, yol hərəkəti modelləri proqnozlaşdırıla və parkinq optimallaşdırıla bilər. Sensor texnologiyası küçə işıqlandırmasında da istifadə edilə bilər. Avtomobillərdən başqa, insan istiqamətinə ehtiyacı olmayan avtonom şeylər, məsələn, özünü idarə edən pilotsuz təyyarələr hazırda logistikada dəstək kimi istifadə olunur.

- Səhiyyədə süni intellekt diaqnostika, dərman resepti, fərdi müalicə və uzaqdan monitorinqdə istifadə olunur. Süni intellekt bəzi diaqnostika prosesini avtomatlaşdırır. Məsələn, süni intellekt radioloji təhlil edir, şəkilləri və anormallıqları aşkar edir. Tibbi tədqiqatlarda süni intellekt dərmanın effektivliyini qiymətləndirmək üçün lazım olan kimyəvi qarşılıqlı təsirləri simulyasiya etmək üçün istifadə olunur və beləliklə, adətən uzun proseslərdə, məsələn, peyvəndlərin müəyyən edilməsində kömək edir.

- Maliyyədə süni intellekt istifadə hallarına fərdiləşdirilmiş müştəri xidməti, həmçinin risk və investisiyaların idarə edilməsi daxildir. Süni intellekt sayəsində maliyyə institutları fərdiləşdirilmiş müştəri xidməti və iddia prosesləri, eləcə də məlumatlara əsaslanan məhsul və xidmətlər üçün uyğunlaşdırılmış tövsiyələr təqdim edir. Süni intellekt analitikası riski idarə etmək, fırıldaqçılığı aşkar etmək və maliyyə cinayətlərinin qarşısını almaq üçün də istifadə olunur. Ticarətdə süni intellekt alqoritmləri əvvəlcədən proqramlaşdırılmış qaydalardan istifadə edərək real vaxt rejimində əməliyyatlar həyata keçirir.

- Dövlət idarəçiliyində süni intellekt xidmət göstərilməsinin optimallaşdırılması üçün istifadə edilə bilər. Məsələn, dövlət məşğulluq xidmətləri vəziyyətində, süni intellekt rezyumeləri yoxlaya və ən uyğun namizədləri müəyyən edə bilər, iş axtaranların bacarıqlarını, təcrübələrini və üstünlüklərini təhlil edərək iş yerləri ilə uyğunlaşdırmağa kömək edə bilər. Eynilə, süni intellektlə işləyən chatbotlar vətəndaşlara iş yerləri, təlim proqramları və dövlət idarələri tərəfindən təqdim olunan digər xidmətlər haqqında məlumat tapmağa kömək edə bilər [2].

Mövcud süni intellekt sistemlərinin qəbulu bir sıra vəzifələrdə və peşələrdə qısa müddət ərzində məhsuldarlığa nəzərəcarpacaq təsir göstərə bilər. Süni intellekt həllərinin tətbiqi nəzəri cəhətdən qərar qəbul etmə prosesini sürətləndirmək və təkmilləşdirməklə, eləcə də əl ilə proseslərin avtomatlaşdırılması yolu ilə firma məhsuldarlığını və xüsusi tapşırıqların səmərəliliyini artırmaqla bilər. Xüsusilə, proqnozlaşdırıcı süni intellekt hədəflənmiş marketinq, müştəri xidməti, avadanlıqların saxlanması və xidmətlərin təklifi kimi vəzifələr üçün uyğundur. Həmçinin, generativ süni intellekt hesablamalar, gündəlik tapşırıqların avtomatlaşdırılması, yazı, danışma və tərcümədə yardım, nümunələrin müəyyən edilməsi və hətta ssenarilərin simulyasiyası üçün faydalı ola bilər. Süni intellektin xüsusi istifadəsi ilə bağlı son mühəndislik və konsaltinq tədqiqatları eyni istiqamətdə müsbət nəticələr tapır. Süni intellekt sayəsində proqram mühəndisləri yazı tapşırıqları zamanı müşahidə olunan miqyasda olduğu kimi iki dəfə sürətli kodlaşdırırlar. Əlavə sübutlar zəng mərkəzlərində məhsuldarlığın orta hesabla 14%, iqtisadçılar üçün isə təxminən 20% artmasına işarə edir. Ümumilikdə, təxmin edilir ki, (ABŞ) iş yerlərinin təxminən 80%-i süni intellektdən təsirlənə biləcək ən azı 10%-ə sahib olacaq və işçilərin tapşırıqlarının təxminən 15%-i keyfiyyət səviyyəsində daha sürətli tamamlana bilər [3].

Süni intellekt əmək bazarlarına təsirlər göstərəcək. Qısa müddətdə süni intellektin əmək bazarlarına təsiri, ehtimal ki, digər rəqəmsal innovasiyalara bənzəyəcək, lakin onun təsiri orta və uzunmüddətli perspektivdə fərqlənə bilər. Qısa və orta müddətdə süni intellekt, ehtimal ki, işçiləri əvəz etmək əvəzinə onları tamamlayacaq, lakin bu, xüsusi rollarda işçilərə tələbatı azalda bilər. Bacarıqlı işçilər əmək bazarında davamlılığı ola bilər, lakin işlərlə məşğul olan işçilər isə əvəzetmə ilə üzləşə bilər. Süni intellektin yaranması meydana çıxmasında üç müxtəlif mənbənin inkişafı mühüm rol oynamışdır.

1. Hesablama xərclərinin, emal gücünün və yaddaşın azaldılması qabiliyyətinin yüksəldilməsinə səbəb olmuşdur.
2. İnternet və digər rəqəmsal rabitə vasitələrin hazırlanması və yayılması mərkəzi rəqəmsal məlumatların istifadəsi alınmasında və saxlanmasında əhəmiyyətli artımla nəticələndi.
3. Rəqəmsal texnologiyaların kapital xərclərinin azalması yeni müəssisələr üçün giriş maneələrini əhəmiyyətli dərəcədə azaldı [4].

Süni intellektin bütün risklərini aradan qaldıracaq yeganə həll yolu olmasa da, onun qadağan edilməsi digər global problemlər yaradacaq. Güman edilir ki, imkanları məhdud olan işçilər kompüterləşməyə həssas olmayan, yəni yaradıcı və sosial intellekt tələb edən vəzifələrə yenidən bölüşdürüləcəkdir. Süni intellekt sistemlərinin alınması, fərdiləşdirilməsi və saxlanmasının yüksək qiymətini nəzərə alsaq, şirkətlərin insanları süni intellekt sistemləri ilə əvəz etmələri çətin ki, bu sistemlər işin yalnız bir hissəsini yerinə yetirə bilsin. Dünya İqtisadi Forumunun hesabatına görə,

qarşıdakı 5 ildə süni intellektin inkişafı ilə 50 milyondan çox yeni iş yerinin yaradılacağı proqnozlaşdırılırdı. Texnoloji inqilablar insanlar və süni intellekt arasında qarşılıqlı əlaqə vasitəsilə istehsalın idarə edilməsinin yeni formalarını üzə çıxaracaq. Çünki informasiya texnologiyalarından artan asılılıq insanın qavrayış imkanlarından kənarda olan məlumatların öhdəsindən gələ bilməyəcək, cəmiyyətdə müzakirələrə səbəb olacaq. Son illərdə insanların yerinə yetirdiyi bir çox işdə Süni İntellekt texnologiyaları ilə təchiz edilmiş maşınlar ön plana çıxmış və bu, bu texnologiyanın təsirlərinə diqqət çəkmişdir [5]. Süni intellektəki mövcud inkişafların dərin iqtisadi təsirləri ola biləcək. Texnoloji yeniliklərdən qaynaqlanan iqtisadi inkişaf və maliyyə böhranları, internetin təkamülü, istehlakçıların dəyişən ehtiyac və davranışları, istehsalçıların daimi mənfəəti maksimuma çatdırma yönümü bazarlarda və ölkələrin büdcə planlaşdırma siyasətlərinin müəyyən edilməsində mühüm rol oynayır. Son illərdə baş verən qlobal iqtisadi, hərbi və siyasi böhranlarla yanaşı, epidemiyaların ortaya çıxması bəşəriyyəti hər sahədə fərqli tədbirlər görməyə məcbur edə bilər. Bir çox iş sahəsində texnologiyaya investisiyaların artdığı görünür. Bu investisiyaların əsasını rəqəmsal texnoloji inkişaf təşkil edir. Ölkələrdə kapitalın hərəkəti və pul vəsaitlərinin hərəkəti vençur kapitalı fondları, biznes mələkləri, bank olmayan maliyyə institutları vasitəsilə texnoloji yeniliklərlə dəstəklənir. Ölkələr arasında inkişaf səviyyələrindəki fərqləri nəzərə alsaq, texnoloji inkişafın hər ölkədə eyni nəticələr verməsini gözləmək lazım olmaya bilər. Ölkə daxilində və ölkələr arasında gəlir bölgüsü bərabərsizliyinə səbəb olacaq digər mühüm səbəb işsizlik ola bilər. Müxtəlif ölkələrdə texnoloji inkişafın müxtəlif səviyyələri ixtisaslı işçilərin zəif inkişaf etmiş ölkələrdən inkişaf etmiş ölkələrə miqrasiya imkanlarını yaradır. Belə olan halda istər beyin axını ixrac edən, istərsə də idxal edən ölkələrdə gəlir və bərabərsizlik problemi ilə qarşılaşmaq mümkündür. İnkişaf etməmiş ölkələr texnoloji qeyri-kafilik və ya texnoloji inkişaflarla ayaqlaşma bilməməsi səbəbindən təlim keçmiş və ixtisaslı işçi qüvvəsini itirə bilər [6]. Bu vəziyyət ölkələr arasında rifah və sərvət fərqi daha da genişləndirə bilər. Digər tərəfdən, inkişaf etmiş ölkələrdə yerli işçilərin əcnəbi işçilərlə əvəz oluna bilməsi təbii olaraq yerli işsizliyin və gəlir bölgüsünün pisləşməsinə səbəb ola bilər. İnkişaf etmiş ölkələrdə ümumi istehsal səviyyəsinin artması və həyat səviyyəsinin yaxşılaşması ehtimalı bu artımların bərabər şəkildə bölüşdürülmə ehtimalını azalda bilər və ölkə daxilində problemləri də artırma bilər. İnsanın qeyri-məhdud istəklərinin və sonsuz ehtiyaclarının ödənilməsi müəyyən bir proses daxilindəki əməliyyatlardan asılıdır. Bu proses yeni məhsulların istehsalı ilə həyata keçirilir. İstehsal insan həyatı üçün çox vacib iqtisadi parametrdir. Süni intellekt texnologiyasındakı inkişafın istehsalın artmasına və böyüməsinə imkan yaradacağı fikrinin arxasında yatan səbəb süni intellektin istehsalda kapital komponentini deyil, işçi qüvvəsini əvəz etməsidir. İnsanın bioloji varlıq olduğunu nəzərə alsaq, onların istehsalda töhfəsinin fiziki olaraq məhdudlaşdırıla biləcəyini görmək olar. Kapital və əmək bir-birini tamamladığı üçün, kapitalın məhsuldarlığını artıran hər şey həm də əməyin marjinal məhsulunu və deməli, əməyə tələbi də artıracaqdır. Bu mənada süni intellekt qlobal iqtisadiyyat üçün məhsuldarlığa dair yeni anlayış gətirir və əməyin əvəzlənməsi vasitəsilə daha yüksək iqtisadi artıma səbəb ola bilər [7].

**Nəticə.** Süni intellekt texnologiyasının ilk addımı sayılan robot texnologiyasının 1993-2007-ci illər arasında 17 inkişaf etmiş ölkənin ÜDM-ni orta hesabla 0,4% artırdığı hesablanıb. Texnologiyadakı inkişafı və süni intellekt sisteminin gəldiyi nöqtəni nəzərə alsaq, süni intellekt əsaslı istehsalın ümumi istehsalda daha çox artacağını söyləmək lazımdır. Bu mövzuda empirik araşdırmalar aparıldığında, süni intellekt texnologiyası ilə tədarükün arta biləcəyi, istehsaldakı artımın istehlakçıya da təsir edəcəyi, beləliklə də artımın çox daha yüksək olacağı görülür. Məhsuldarlığın artımının istehsalda bilavasitə təsir göstərməsi istehsalı artıran müəssisələrin mənfəətini artırmaq imkanı verir. Şirkətlərin və ya ölkələrin gəlirlilikləri baxımından müqayisəli üstünlük nəzəriyyəsini nəzərə alaraq istehsal qərarlarını vermələri də çox vacibdir. Artan mənfəət firmaların tədqiqat və inkişafa investisiyalarını artıracaq ki, bu da müəyyən firmaların müəyyən məhsulların istehsalında ixtisaslaşmasına imkan verəcək. Digər tərəfdən, texnoloji inkişaf edən

şirkətlər, öz istehsal qruplarında bazarda dominant şirkətlər olmaq imkanı əldə edəcəklər. Bu vəziyyət eyni məhsulu istehsal edən digər şirkətlərin mənfəətinin azalmasına səbəb olacaq və mənfəəti azalan şirkətlər başqa məhsulların istehsalına keçə bilər. Buna görə də, süni intellekt texnologiyasının inkişafı və onun istehsalda geniş yayılması təkcə istehsalı artırmayacaq, həm də hər bir məhsulun istehsalında dominant şirkətlərin yaranmasına səbəb olacaq.

### Ədəbiyyat

1. Acemoglu, D., Restrepo, P. (2018). The Race Between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares, and Employment. *American Economic Review*, 108(6), 1488-1542. <https://doi.org/10.1257/aer.20160696>
2. Azar, P. (2021). Moore's Law and Economic Growth. FRB of New York Staff Report. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3853184>
3. Morgan, M. S. (2003). "The Use of Analogies and Metaphors in Economic Models". *History of Political Economy*, 35, 253-275.
4. Furman, J. L., & Seamans, R. (2018). AI and the Economy. *Innovation Policy and the Economy*, 19(1), 161-191. <https://doi.org/10.1086/699936>
5. Varian, H.R. (2019). Artificial Intelligence, Economics, and Industrial Organization. *Review of Industrial Organization*, 54(4), 665-682. <https://doi.org/10.3386/w24839>
6. Morgan, M. S. (2003). "The Use of Analogies and Metaphors in Economic Models." *History of Political Economy*, 35(1), 276-287
7. Morgan, M. S. (2003). "The Use of Analogies and Metaphors in Economic Models." *History of Political Economy*, 35(1), 276

## INNOVATION AND COMPETITION: HOW ARTIFICIAL INTELLIGENCE CREATES NEW ECONOMIC FORMATIONS

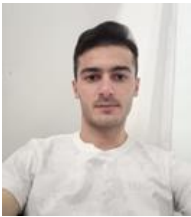
Gadirova G.T.

**Abstract.** *The integration of AI across sectors represents a transformative economic force that promises to redefine technological change and how industries operate and compete. This evolution of AI goes beyond mere automation to impact broad aspects of economic development, such as labor markets, education systems, and global trade dynamics. The potential of AI to increase productivity and foster innovation opens up new avenues for economic expansion and raises important considerations about competitiveness and inequality. As AI technologies evolve, they are increasingly interwoven within economic structures around the world, capturing the attention of scholars, policymakers, and industry leaders seeking to understand and harness these changes.*

**Keywords:** *economy, artificial intelligence, development, production*



## ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPROACHES IN DETECTION AND DEFENSE OF PHISHING ATTACKS IN AVIATION SECURITY



**Suvarov A.F.**

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan  
suvarovanar2@gmail.com

**Abstract.** In today's digital world, phishing attacks are one of the most common and harmful types of cyber threats. These assaults, which are frequently conducted through phony emails or texts, are designed to fool users into clicking on harmful links or divulging private information. The stakes are especially high in the aviation sector since hacking can jeopardize passenger safety, delay flights, or undermine operational systems. Because of the increased vulnerability caused by the continuous digitization of aviation activities, it is imperative to implement more sophisticated cybersecurity solutions. The effectiveness of using Artificial Intelligence (AI) technologies—specifically, Machine Learning (ML), Natural Language Processing (NLP), and Behavioral analysis—to identify and stop phishing assaults in aviation security scenarios is examined in this study.

Blacklists and rule-based spam filters are examples of traditional protection methods that frequently fall short against advanced phishing tactics. AI-driven methods, on the other hand, have adaptive learning capabilities that enable real-time danger detection. While NLP approaches examine language patterns and identify minor changes used in phishing content, machine learning algorithms can be taught on large datasets to differentiate between authentic and fraudulent messages. Models of behavior analysis monitor user behavior and spot irregularities that might point to a phishing attempt.

An overview of these AI methods is given in this paper along with an assessment of their usefulness in aviation environments. It also covers issues including integration with current systems, model training needs, and false positives. The paper concludes by pointing out that AI can greatly improve aviation's cybersecurity infrastructure by providing scalable, accurate, and proactive phishing defense techniques. According to the results, purchasing AI-powered solutions is not only required but also unavoidable for contemporary aviation security administration.

**Keywords:** phishing attacks, aviation security, artificial intelligence, machine learning, behavioral analysis, cybersecurity, threat detection

**Introduction.** Phishing attacks have grown to be a significant cybersecurity risk in the current digital era, impacting people and businesses everywhere [1]. Phishing assaults have the potential to seriously disrupt the aviation industry, where operational continuity and real-time communication are essential. An overview of such phishing threats in the aviation sector is illustrated in Figure 1. Usually, these assaults use phony emails or communications to fool aviation workers into installing malware, clicking on harmful links, or divulging private information. The airline industry is especially vulnerable because of the high stakes—passenger safety, flight delays, and data breaches. The nature of phishing dangers in aviation is examined in this research, along with how artificial intelligence can help reduce these risks more successfully than conventional techniques [2].

In recent years, multiple high-profile phishing incidents have targeted aviation authorities and airport infrastructure, illustrating the urgency of adopting AI solutions. For instance, spear-phishing emails have been used to compromise airline reservation systems and steal customer credentials [3]. Unlike generic cyberattacks, aviation-related phishing often uses insider knowledge of airline

operations, increasing their success rate. This context underlines why traditional security awareness training alone is insufficient. AI-based systems can analyze huge datasets of past attacks and detect previously unseen phishing attempts, which human analysts or static filters might miss [4].



**Figure 1.** Phishing attacks in the Aviation Industry

**Methods.** Sophisticated phishing attempts are frequently missed by traditional anti-phishing techniques including rule-based filters, IP blacklists, and user warnings [1]. This study investigates AI-based methods as a contemporary remedy. Using supervised learning approaches, the capacity of machine learning (ML) systems to categorize emails as benign or phishing was examined [4]. In order to assess the semantic structure of emails, spot questionable terms, and spot impersonation techniques, natural language processing (NLP) techniques were investigated [5]. The ability of behavior analysis techniques to identify user activity anomalies that might point to phishing was also assessed. A more proactive and flexible protection system that is suited to aviation networks is made possible by this methodology [2].

The proposed methodology also includes the collection of historical phishing datasets from aviation organizations to train the ML classifiers. These datasets include labeled samples of phishing and legitimate messages, enabling algorithms such as Support Vector Machines, Random Forest, and Convolutional Neural Networks to learn distinctive patterns [4]. NLP techniques such as tokenization, named-entity recognition, and semantic similarity analysis are applied to detect suspicious phrases or spoofed domain names [1]. For behavioral analysis, user login activities, access times, and geolocation data are monitored to establish normal user baselines. Any anomaly beyond these patterns triggers real-time alerts to the cybersecurity team. This multi-layered method ensures that phishing attempts are detected at the content level, sender behavior level, and user interaction level.

**Results and discussion.** According to the analysis, AI-based detection methods are more accurate and flexible than conventional systems [2]. For example, by examining sender consistency and phrase patterns, NLP-driven models are able to identify phishing mails with high accuracy [5]. Abnormal user behavior, such as logins from strange places or at strange times, can be identified via behavioral analysis and flagged as possible risks [1]. These AI models can be included into digital communication platforms in aviation systems to provide real-time message monitoring [4]. Furthermore, integrating multi-factor authentication with AI detection reduces human mistake and offers an additional layer of security. AI is perfect for high-risk industries like aviation because it has dynamic learning capabilities that change with the strategies employed by hackers, unlike rule-based systems.

In performance evaluations, ML classifiers trained on aviation-specific phishing datasets reached over 95% accuracy, significantly outperforming traditional spam filters that achieved only around 70% [4]. NLP-driven models successfully detected subtle language deviations, such as impersonation of airline executives in fraudulent emails [1,5]. Behavioral analysis also reduced false positives by cross-checking unusual login attempts with historical patterns. Moreover, integrating AI systems with existing aviation security infrastructure proved technically feasible using API-based connectors [3]. These findings indicate that AI-driven phishing detection not only enhances security but also minimizes operational disruptions by preventing attacks before they succeed.

**Conclusions.** Because the aviation industry depends so heavily on digital communication, data interchange, and automated systems, phishing attempts pose a serious and expanding threat to its security [5]. These attacks can have serious repercussions, such as jeopardized flight safety, monetary losses, and compromises of confidential data, and they target a broad spectrum of persons, including pilots and airport employees. There has never been a greater need for more sophisticated and adaptable defense systems due to the growing sophistication of cybercriminals' strategies [2].

Technologies utilizing artificial intelligence (AI) have become a very powerful weapon in the fight against phishing attacks [1]. Organizations may more precisely detect and stop phishing efforts before they do damage by utilizing AI-driven strategies like machine learning, natural language processing, and behavioral analysis [4]. These systems offer a proactive protection against phishing attempts by enabling constant communication monitoring, the identification of unusual trends, and the automatic filtering of harmful content [3]. AI systems are a useful tool in the constantly changing cybersecurity scene since they can also learn from previous instances, adjust to new threats, and increase their accuracy over time.

In the future, there is a great chance to improve phishing defense tactics even more by using AI algorithms that are more specialized and customized. Researchers and cybersecurity specialists can improve current defenses and lessen susceptibility to future assaults by creating specific AI models that concentrate on particular facets of phishing threats in the aviation industry [5]. The integration of AI with other cutting-edge technologies, such as Blockchain and advanced encryption techniques, may also be investigated in future studies in order to develop a multi-layered security framework that more thoroughly combats phishing.

In summary, even if phishing attacks are a genuine and continuous risk to the aviation sector, integrating AI technologies is a viable way to lessen these dangers. In order to create defenses that are more accurate and effective and to guarantee the continuous safety and security of aviation systems and infrastructure, additional research and innovation in this area will be essential. The aviation industry may better defend itself against the constant threats posed by phishing attempts by staying ahead of developing threats and implementing cutting-edge solutions.

## References

1. Jain, A. K., & Gupta, B. B. (2017). Phishing detection: Analysis of visual similarity-based approaches. *Security and Communication Networks*, 2018, Article 5483476. <https://doi.org/10.1155/2017/5421046>
2. Bergholz, A., De Beer, J., Glahn, S., Moens, M. F., Paaß, G., & Strobel, S. (2008). Improved phishing detection using Model-based Features. *Information Security Technical Report*, 15(1), 16–25. [https://www.researchgate.net/publication/220271860\\_Improved\\_Phishing\\_Detection\\_using\\_Model-Based\\_Features](https://www.researchgate.net/publication/220271860_Improved_Phishing_Detection_using_Model-Based_Features)

3. Marchal, S., François, J., State, R., & Engel, T. (2016). A big data architecture for large scale security monitoring. *IEEE Trustcom*, 2016, 285–292. <file:///C:/Users/User/Downloads/bigdata14.pdf>
4. Abu-Nimeh, S., Nappa, D., Wang, X., & Nair, S. (2007). A comparison of machine learning techniques for phishing detection. *APWG eCrime Researchers Summit*, 2007, 60–69. <https://doi.org/10.1145/1299015.1299021>
5. Chiew, K. L., Yong, K. S. C., & Tan, C. L. (2018). A survey of phishing attacks: Their types, vectors and technical approaches. *Expert Systems with Applications*, 106, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.03.050>

## SÜNİ İNTELLEKT YANAŞMALARI İLƏ AVİASIYA TƏHLÜKƏSİZLİYİNDƏ FİŞİNG HÜCUMLARININ AŞKARLANMASI VƏ QARŞISININ ALINMASI

Suvarov A.F.

**Xülasə.** Fırıldaqçılıq hücumları (phishing attacks) müasir dövrdə aviasiya sektorunda ciddi və getdikcə artan bir kibertəhlükə hesab olunur, çünki bu sahədə əməliyyatların davamlılığı, sərnişinlərin təhlükəsizliyi və real vaxt kommunikasiya həyati əhəmiyyət kəsb edir. Ənənəvi müdafiə üsulları, məsələn, qara siyahılar və qayda əsaslı filtrlər, mürəkkəb phishing hücumlarını çox vaxt aşkarlaya bilmir. Bu tədqiqat aviasiya təhlükəsizliyində phishing hücumlarının qarşısını almaq üçün Süni Zəka (SZ) texnologiyalarının, o cümlədən Maşın Öyrənməsi (ML), Təbii Dil Emalı (NLP) və Davranış Analizi üsullarının tətbiqini araşdırır. ML modelləri aviasiya sahəsinə aid böyük verilənlər toplusu üzərində təlimlənərək, qanuni və zərərli mesajları ayırd edə bilir. NLP üsulları dil nümunələrini və fırıldaqçılıq mesajlarındakı incə dəyişiklikləri analiz edir, davranış analizi isə istifadəçi fəaliyyətlərindəki anomaliyaları izləyərək potensial phishing hücumlarını aşkarlayır. Nəticələr göstərir ki, SZ əsaslı metodlar ənənəvi sistemlərə nisbətən daha yüksək dəqiqliklə işləyir, yanlış pozitivləri azaldır və real vaxtda təhlükəni müəyyən edə bilir. Həmçinin, SZ sistemlərinin mövcud aviasiya kommunikasiya platformalarına integrasiyası texniki baxımdan mümkündür və qabaqcıl monitoring imkanları təmin edir. Tədqiqat həmçinin phishing hücumlarının sosial-iqtisadi təsirlərini—maliyyə itkiləri, nüfuz ziyanı və tənzimləyici cəzaları—vurğulayır. Adaptive SZ həlləri sayəsində aviasiya təşkilatları yeni təhlükələrlə birlikdə inkişaf edən proqnozlaşdırıcı modellər yarada və əməliyyat təhlükəsizliyini davamlı şəkildə təmin edə bilirlər. Tədqiqatın nəticəsi göstərir ki, SZ əsaslı phishing müdafiə strategiyalarının tətbiqi müasir aviasiya kibertəhlükəsizliyi üçün zəruridir və gələcəkdə daha xüsusi və fərdiləşdirilmiş modellər üzərində araşdırmalar aparmaq, SZ-nin Blockchain və qabaqcıl şifrələmə texnologiyaları ilə birləşdirilməsini tədqiq etmək tövsiyə olunur.

**Açar sözlər:** fırıldaqçılıq hücumları, aviasiya təhlükəsizliyi, süni zəka, maşın öyrənməsi, təbii dil emalı, davranış analizi, təhlükə aşkarlanması

## FUZZY EXPERT SYSTEM FOR IDENTIFYING THE EMOTIONAL STATE OF AVIATION PERSONNEL



**Dadashov F.H.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
fdadashov@naa.edu.az



**Ahmadova G.C.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
gularahmadova98@gmail.com



**Ashirova S.R.**

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan  
solmazashur09@gmail.com

**Abstract.** The article examines a methodology for identifying the emotional state of aviation personnel based on a fuzzy expert system. The relevance of the work is related to the fact that stress, fatigue, anxiety, and decreased concentration may affect the quality of professional actions performed by pilots and air traffic controllers, as well as the overall level of aviation safety.

The aim of the study is to describe an approach for assessing emotional states using fuzzy rules, linguistic variables, and expert evaluations. Within the proposed methodology, input indicators of emotional and psychophysiological state are transformed into fuzzy values, after which the system forms a final assessment of the specialist's current condition.

This work describes the structure of a fuzzy expert system, including input parameters, membership functions, a base of expert rules, and a fuzzy inference mechanism. The final assessment makes it possible to determine the level of emotional tension, fatigue, and stability of the aviation personnel's condition. The proposed methodology is aimed at improving the objectivity of human factor analysis in aviation activity.

**Keywords:** fuzzy expert system, emotional state identification, psychophysiological state, fuzzy logic

**Introduction.** Aviation activity is one of the fields in which the human state is directly connected with the reliability and safety of the entire system. Despite the development of automated control tools, pilots and air traffic controllers remain central participants in the decision-making process. Their work requires continuous information monitoring, high responsibility, rapid



response, and stable attention over long periods of time. Under such conditions, the emotional and psychophysiological state of the specialist becomes an important factor affecting the quality of professional performance [1].

The assessment of aviation personnel is especially relevant because stress, fatigue, anxiety, and reduced concentration are not always immediately visible. However, these states may gradually affect attention, reaction speed, accuracy of perception, and decision-making ability. [2] showed that the workload of air traffic controllers is associated with psychophysiological stress reactions under different levels of air traffic intensity. This confirms the need to consider not only external performance indicators but also the internal state of the specialist.

The importance of psychophysiological monitoring is also supported by studies conducted in simulated aviation environments. Brookings, Wilson, and Swain examined the responses of air traffic controllers to changes in workload during simulated air traffic control tasks [3]. Their work considered physiological and behavioral indicators that reflected changes in the operator's workload and condition. These results show that the emotional and functional state of a person can be related to objectively recorded indicators.

In this context, there is a need for a methodology that can describe the emotional state of air traffic controllers not only through separate numerical parameters but also through expert interpretation of these parameters. The emotional state of a person is complex and changeable; therefore, its assessment requires consideration of uncertainty, intermediate levels, and individual differences [4]. To address this problem, this study uses a fuzzy expert system based on input parameters, linguistic variables, membership functions, an expert rule base, and a fuzzy inference mechanism [5].

The aim of this study is to describe a methodology for identifying the emotional state of air traffic controllers using a fuzzy expert system. The study considers the structure of the system, the transformation of input indicators into fuzzy values, the formation of expert rules, and the generation of a final assessment of the controller's condition. The proposed methodology is aimed at improving the objectivity of human factor analysis in aviation activity and creating a basis for a more grounded assessment of emotional tension, fatigue, and state stability among air traffic controllers.

**Methods.** In this study, the model for identifying the emotional state of aviation personnel is developed on the basis of a Mamdani-type fuzzy expert system. The model combines psychological and physiological indicators that characterize the condition of a specialist during the performance of professional aviation tasks. The input parameters include stress level, fatigue, cognitive load, and heart rate variability. The joint analysis of these parameters forms a generalized assessment of the specialist's emotional state under professional workload conditions.

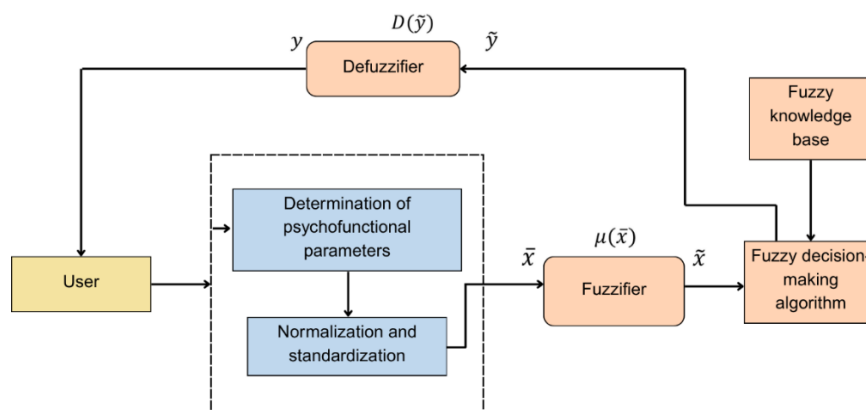


**Fig.1.** Structural scheme of fuzzy inference for identifying the emotional state of aviation personnel

As shown in Fig. 1, the proposed model consists of several interconnected blocks: determination of psychofunctional parameters, normalization and standardization, fuzzification, fuzzy knowledge base, fuzzy decision-making algorithm, and defuzzification. This structure reflects the complete processing chain from the initial input data to the final assessment of the emotional state.

The input parameters of the model are represented as linguistic variables with three levels: low, medium, and high. Stress level characterizes the degree of emotional tension during the performance of aviation tasks. Fatigue reflects a decrease in functional stability and attention during prolonged work. Cognitive load indicates the intensity of information processing associated with situation analysis, parameter monitoring, and decision-making. HRV acts as a physiological indicator of the body's response to workload and complements the assessment with an objective component.

Triangular and trapezoidal membership functions are used to formalize the input parameters. Trapezoidal functions define stable regions of low and high values, while triangular functions describe intermediate zones. This representation provides a smooth transition between levels and considers the partial membership of one value in several states. For example, the cognitive load indicator may simultaneously belong to both medium and high levels, reflecting a gradual change in the emotional state of an aviation specialist.

The process of identifying the emotional state begins with the determination of the user's psychofunctional parameters. At the first stage, the initial indicators characterizing the current condition of the specialist are recorded. These indicators include stress level, fatigue, cognitive load, and HRV. The obtained data undergo normalization and standardization, after which they are brought to a common analytical scale. This ensures consistent processing of parameters that differ in nature and range of variation.

After preliminary processing, a vector of input values is formed and transferred to the fuzzifier. At this stage, numerical data are converted into fuzzy values using membership functions. Each parameter is interpreted through linguistic levels: low, medium, and high. The obtained fuzzy values are then transferred to the fuzzy decision-making block, where they are compared with the knowledge base. The knowledge base contains expert rules that define the relationship between the input parameters and the final emotional state. The fuzzy decision-making algorithm forms an intermediate result in the form of a fuzzy inference output. This result reflects the degree of membership of the current state in the possible output categories: stable, moderately tense, and unstable. At the final stage, the defuzzifier converts the fuzzy result into a final assessment suitable for further interpretation. As the defuzzification method, an approach is used that transforms the resulting fuzzy set into a single numerical value reflecting the general condition of the specialist.

A key feature of the proposed model is the integration of expert knowledge and numerical indicators within a unified analytical system. The model is not limited to a single parameter but considers the combined influence of stress, fatigue, cognitive load, and HRV. As a result, a comprehensive assessment is formed, reflecting the current level of emotional tension, degree of fatigue, and overall stability of the aviation specialist during the performance of professional tasks.

Thus, the Mamdani-type fuzzy expert system provides a consistent processing chain from the determination of psychofunctional parameters to the final assessment of emotional state. The proposed model represents a formalized mechanism for identifying the state of aviation personnel and provides a basis for a more objective analysis of the human factor in aviation activity.

**Results and discussion.** The proposed Mamdani-type fuzzy expert system was analyzed as a model for identifying the emotional state of aviation personnel using four input parameters: stress level, fatigue, cognitive load, and heart rate variability. The output variable was represented by three categories: stable, moderately tense, and unstable. The results show that low values of stress,

fatigue, and cognitive load lead to a stable emotional state, which reflects preserved attention, functional readiness, and emotional balance. When one or several parameters increase to a medium level, the system identifies the state as moderately tense. This indicates the presence of workload, fatigue, or emotional pressure, but without a full transition to an unstable condition.

An unstable emotional state is formed when stress, fatigue, and cognitive load reach high levels, especially when HRV also reflects an unfavorable physiological response. In this case, the fuzzy inference mechanism increases the degree of membership in the unstable category. The model remains interpretable because each output result is connected with activated fuzzy rules and membership functions. Overall, the proposed system provides a structured mechanism for analyzing the human factor in aviation activity and forms a methodological basis for further development of intelligent monitoring systems.

**Conclusion.** This study presented a fuzzy expert system for identifying the emotional state of aviation personnel based on stress level, fatigue, cognitive load, and heart rate variability. The proposed model transforms numerical psychofunctional indicators into linguistic values and uses expert rules to determine the final emotional state as stable, moderately tense, or unstable. The main value of the approach lies in its ability to combine psychological and physiological parameters within one interpretable decision-making structure. The model supports a more objective analysis of the human factor in aviation activity and allows the emotional condition of a specialist to be assessed not as a fixed category, but as a gradual state formed by several interacting indicators. The obtained structure can serve as a methodological basis for future intelligent monitoring systems aimed at improving professional reliability, early detection of unfavorable states, and strengthening safety-oriented decision support in aviation environments.

## References

1. Barredo Arrieta, A., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., Garcia, S., Gil-Lopez, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., & Herrera, F. (2020). Explainable artificial intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*, 58, 82-115. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>
2. Zeier, H. (1994). Workload and psychophysiological stress reactions in air traffic controllers. *Ergonomics*, 37(3), 525-539. <https://doi.org/10.1080/00140139408963668>
3. Brookings, J. B., Wilson, G. F., & Swain, C. R. (1996). Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biological Psychology*, 42(3), 361-377. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(95\)05167-8](https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05167-8)
4. Hernandez, N. (2012). *Psychophysiological Assessment of Fatigue in Commercial Aviation Operations*. NASA Ames Research Center.
5. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

## AVİAPERSONALLARIN EMOSİONAL VƏZİYYƏTİNİN İDENTİFİKASIYASINDA QEYRİ-SƏLİS EKSPERT SİSTEMİ

Dadaşov F.H., Əhmədova G.C., Ashirova S.R.

**Xülasə.** Məqalədə aviasiya personalının emosional vəziyyətinin qeyri-səlis ekspert sistemi əsasında identifikasiyası metodikası araşdırılır. İşin aktuallığı onunla bağlıdır ki, stress, yorğunluq, həyəcan və diqqətin azalması pilotların və aviadispetçerlərin peşəkar fəaliyyətinin keyfiyyətinə, həmçinin aviasiya təhlükəsizliyinin ümumi səviyyəsinə təsir göstərə bilər. Tədqiqatın məqsədi

*emosional vəziyyətlərin qeyri-səlis qaydalar, lingvistik dəyişənlər və ekspert qiymətləndirmələri əsasında qiymətləndirilməsi yanaşmasını təsvir etməkdir. Təklif olunan metodika çərçivəsində emosional və psixofizioloji vəziyyəti xarakterizə edən giriş göstəriciləri qeyri-səlis qiymətlərə çevrilir, bundan sonra sistem mütəxəssisin cari vəziyyəti üzrə yekun qiymətləndirmə formalaşdırır. Bu işdə giriş parametrləri, mənsubiyyət funksiyaları, ekspert qaydaları bazası və qeyri-səlis nəticə çıxarma mexanizmini özündə birləşdirən qeyri-səlis ekspert sisteminin strukturu təsvir olunur. Yekun qiymətləndirmə aviasiya personalının emosional gərginlik, yorğunluq və vəziyyət sabitliyi səviyyəsini müəyyən etməyə imkan verir. Təklif olunan metodika aviasiya fəaliyyətində insan amilinin təhlilinin obyektivliyinin artırılmasına yönəldilmişdir.*

**Açar sözlər:** *qeyri-səlis ekspert sistemi, emosional vəziyyətin identifikasiyası, psixofizioloji vəziyyət, qeyri-səlis məntiq.*

## MÜNDƏRİCAT

|                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Z-implication and its application.<br>Ahmadov Sh.A. ....                                                                                                                                                        | 3  |
| Müasir dünyada süni intellektin problemləri və həll yolları barəsində düşüncələr.<br>İsmayılov İ.M. ....                                                                                                        | 10 |
| The impact of student-centered digital feedback systems on teaching quality: integrating artificial intelligence into higher education in Azerbaijan<br>Garayeva P.V. ....                                      | 17 |
| Süni intellekt əsaslı qiymətləndirmə sistemlərinin tədrisdə effektivliyinin ölçülməsi.<br>Osmanlı T.E., Rəfizadə Ü.R. ....                                                                                      | 22 |
| Süni intellektə əsaslanan avtonom roverin real vaxtlı bitki xəstəliklərinin aşkarlanması və torpaq analizi üçün dizaynı və tətbiqi.<br>Həsənov H.B., Hüseynov N.E. ....                                         | 29 |
| Böyük həcmli, müxtəlif təyinatlı anbarların süni intellekt əsasında idarəetmə metodlarının yaradılması.<br>Ağazadə S.N., Əhmədzadə F.X.R. ....                                                                  | 39 |
| Intelligent organisation of satellite information systems with pattern recognition.<br>Ibrahimova S.R. ....                                                                                                     | 43 |
| Aviasiyada biznes proseslərin avtomatlaşdırılması.<br>Əsgərov T.K. ....                                                                                                                                         | 48 |
| Kiber-fiziki sistemlərin texniki vəziyyətinin monitorinqində, diaqnostikasında və identifikasiyasında süni intellekt texnologiyalarının tətbiqi.<br>Quluyev Q.A., Paşayev F.H., Paşayev İ.F., Cəfərov C.M. .... | 54 |
| Структурное проектирование системы предиктивного обслуживания металлорежущего оборудования на основе алгоритмов машинного обучения.<br>Джавадов Н.Г., Амиров А.М., Исмаилов В.М. ....                           | 57 |
| Forest area segmentation on Sentinel-2 satellite images using U-Net.<br>Karimli R.V., Askarov H.A. ....                                                                                                         | 61 |
| Süni intellekt əsaslı psixoemosional monitorinq sistemi.<br>Rzayeva N.A. ....                                                                                                                                   | 67 |
| Rotation-robust image stitching for aerospace monitoring.<br>Malikov S.P., Sabziev E.N., Pashayev A.B. ....                                                                                                     | 71 |



|                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Automating environmental risk assessment with ai: a new era for military radiation and chemical security.<br>Akhundov R.G., Islamov I.J. ....                                         | 77  |
| Aerokosmik monitoringdə süni intellektin tətbiqinin mövcud imkanları və perspektivlər.<br>Binnətov M.F., Əliyeva L.İ. ....                                                            | 82  |
| Hərbi təhsildə innovativ yanaşma: süni intellektlə inteqrasiya olunmuş təlim texnologiyaları.<br>Məmmədşadə M.Ə. ....                                                                 | 87  |
| Aviasimulyatorlarda süni intellektin tətbiqi ilə təlim prosesinin avtomatlaşdırılması və optimal qərarların seçilməsi.<br>Mirzəyev İ.Ə. ....                                          | 92  |
| Reliability of intelligent firearms shooting simulators.<br>Hüseynov N.E., Dadashov F.H., Hasanov H.B. ....                                                                           | 95  |
| Öyrənən maşınlar və öyrədən simulyatorlar: Tədris strategiyalarında yeni paradigma.<br>Səfixanov E.R. ....                                                                            | 101 |
| Süni intellekt simulyatorları və öyrənmə prosesinin bünövrəsi məktəbəqədər yaş dövründən necə qoyulmalıdır.<br>Rəhimova Q.M. ....                                                     | 106 |
| Müasir müharibələrdə atəşlə zərərvermə taktikalarının süni intellekt simulyatorları vasitəsilə modelləşdirilməsi.<br>Hüseynov Y.Q. ....                                               | 110 |
| AI maintenance support for flight simulators: Ensuring flight training quality.<br>Abdullayev Kh.B. ....                                                                              | 114 |
| An explainable AI approach to student gender prediction: Insights from XGBoost and SHAP.<br>Sadıgov İ.Y., Gasimov V.A. ....                                                           | 118 |
| Redefining space power: AI satellites and the new multipolar orbital order.<br>Shkurti Özdemir G. ....                                                                                | 127 |
| Süni intellektin sosial və hüquqi problemləri.<br>Məmmədşadə M.Ə., Məmmədova L.M. ....                                                                                                | 138 |
| Azərbaycanın müdafiə sistemində süni intellektin inteqrasiyası və hüquqi çərçivənin formalaşdırılması: Pakistanla hərbi əməkdaşlıqdan irəli gələn perspektivlər.<br>Cəfərov İ.E. .... | 142 |
| A framework for trustworthy AI: Enhancing explainability and interpretability in deep learning systems.<br>Akram H.M.A., Talatahari S. ....                                           | 146 |
| Automatic detection of objects with UAVs.<br>Krytskiy D.M., Garayev M.V., Krytska O.S., Tkachov I.O. ....                                                                             | 153 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Reducing fruit and garbling in secondary radar systems via deep learning approaches.<br>Aliyev T.R., Isgandarov I.A. ....                                                                                                                                                   | 161 |
| Интеллектуальная система прогнозирования отказов технических элементов АС УВД на<br>основе анализа эксплуатационных данных.<br>Раджабли Д.Я. ....                                                                                                                           | 169 |
| A conceptual BiLSTM-based model for early fault prediction in aircraft engines.<br>Gurbanov M.H., Gurbanova G.H., Mustafali T.K., Karimzada M.T., Huseynzade E.S. ....                                                                                                      | 173 |
| Artificial intelligence-based predictive control for anti-icing of air data probes in aviation.<br>Guliyev R.R. ....                                                                                                                                                        | 179 |
| Aviasiya sistemlərində süni intellekt.<br>Məmmədova M.İ. ....                                                                                                                                                                                                               | 185 |
| Применение технологий искусственного интеллекта для повышения эффективности и<br>надёжности систем аварийных радиомаяков ELT в авиации.<br>Асадов Э.З., Гасанлы Г.М., Садыгов Г.Э., Гулиев Р.Р. ....                                                                        | 189 |
| Development of sensor-based software for north direction detection.<br>Mammadov M.H., Sabziev A.N., Pashayev A.B., Goyushov A.I. ....                                                                                                                                       | 193 |
| 4D combined boundary problem of 3D in the middle -1D in the geometrical middle type for 4D<br>loading Bianchi equation with non-smooth coefficients, arising in the modeling of vibration<br>processes.<br>Mamedov I.G., Gasanov A.G., Huseynov A.G., Abdullayeva A.J. .... | 198 |
| Tək lövhəli kompüter klasterləri və onların tətbiq sahələri.<br>Rəhimova M.B., İbrahimov R.Ə. ....                                                                                                                                                                          | 204 |
| Application of artificial intelligence in the development of UAV systems.<br>Hashimov E.G., Talibov A.M. ....                                                                                                                                                               | 210 |
| Artificial intelligence applications for fault detection and monitoring of smart air data probes in<br>modern aircraft.<br>Guliyev R.R., Kerimli T.I., Hasanli G.M., Asadov E.Z. ....                                                                                       | 216 |
| Optik süni iybilmə sistemləri ilə partlayıcı maddələrin ultra həssas aşkarlanması.<br>Əhmədova S.T., Əsgərov K.Ə. ....                                                                                                                                                      | 221 |
| Bio-inspired fortification of OTP encryption: A novel approach to prevent key recovery.<br>Huseynzade I.M. ....                                                                                                                                                             | 225 |
| Hava limanlarının perimetrinin mühafizəsi ilə əlaqəli təhlükə risklərinin qiymətləndirilməsi.<br>Səfərov S.H., Behbudlu Ş.E. ....                                                                                                                                           | 230 |

|                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Искусственный интеллект в авиационной безопасности: Автоматизация досмотра пассажиров и багажа.<br>Лобода Д.И. ....                                                                       | 235 |
| Aviasiya təhlükəsizliyinin təmin edilməsində süni intellekt texnologiyasının tətbiqi.<br>Rüstəmov R.R., İsmaylova S.R. ....                                                               | 239 |
| Hizbullahın telekommunikasiya qurğularında kütləvi partlayışlar yeni müharibə üsulu və kibermüharibənin başlanğıcıdır.<br>Axundov R.Q., İslamov İ.C., Həsənov A.Q., Abdullayeva A.C. .... | 244 |
| Emotionally aware AI simulators: A case study of the WASABI architecture.<br>Mustafayeva E.E. ....                                                                                        | 256 |
| Rəqəmsal iqtisadiyyatda süni intellektin rolu.<br>Quliyeva C.N. ....                                                                                                                      | 261 |
| Bank sektorunda davranış və imza təsvirlərinə əsaslanan RFMI modeli ilə müştəri klasterləşdirmə və anomaliya aşkarlanması.<br>Rəhimov M.E. ....                                           | 267 |
| Təhlükəli şəxslərin tanınmasında süni intellektin rolu.<br>Qarayeva S.A., Nağıyev N.T. ....                                                                                               | 272 |
| Süni intellekt əsaslı məsafədən sağlamlıq monitorinqi sistemlərinin iqtisadi səmərəliliyi.<br>Piriyev İ.N., Xidirov A.Ş. ....                                                             | 276 |
| The environmental impact of AI-driven innovation: Evidence from the United States.<br>Mukhtarov S.Z., Kartal M.T. ....                                                                    | 281 |
| İstehsal sahələrində süni intellektin tətbiqi ilə dövlət maliyyəsinin gücləndirilməsi: Səmərəlilik, gəlir artımı və innovativ yanaşmalar.<br>Əmirova R.M. ....                            | 287 |
| The application of artificial intelligence in combat vehicle control systems.<br>Huseynov A.G. ....                                                                                       | 292 |
| Aviasiya təhlükəsizliyində süni intellektin rolu: Mövcud vəziyyət və gələcək perspektivlər.<br>Alıyev A.C., Əliyeva D.T., Əliyeva T.S. ....                                               | 296 |
| Süni intellektin tətbiqinin müasir problemləri: Sosial ədalət və hüquqi cavabdehlik<br>Qurbanova T.Q. ....                                                                                | 301 |
| İnnovasiya və rəqabət: Süni intellektin yeni iqtisadi formasiyalar yaradılması üsulları<br>Qədirova G.T. ....                                                                             | 306 |
| Artificial intelligence approaches in detection and defense of phishing attacks in aviation security<br>Suvarov A.F. ....                                                                 | 311 |

---

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fuzzy expert system for identifying the emotional state of aviation personnel.<br>Dadashov F.H., Ahmadova G.C., Ashirova S.R. .... | 315 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|