

Milli Aviasiya Akademiyası



ISSN 1811-7341

ELMİ MƏCMUƏ

Cild 28, №2, 2026



National Aviation Academy

SCIENTIFIC JOURNAL

Volume 28, №2, 2026

Baş redaktor

F.-r.e.d., akademik Arif Mir Cəlal oğlu Paşayev

Elmi redaktor

T.e.d., prof. Rasim Nəsim oğlu Nəbiyev

Redaksiya heyətinin üzvləri (elm sahələri üzrə)

Texnika elmləri

T.e.d., prof. Afiq Rəşid oğlu Həsənov (redaktor)

T.e.d., prof. Ədalət Soltan oğlu Səmədov

F.-r.e.d., prof. Məsud Arif oğlu Əfəndiyev, Helmhols Mərkəzi, Münhen, Almaniya

F.-r.e.d., prof. Əli Tofiq oğlu İsmayılzadə, Karlsruhe Texnologiya İnstitutu, Almaniya

T.e.d., prof. Aleksandr Alekseyeviç İqolkin, Samara Universiteti, Rusiya

T.e.n., dos. Oleq Borisoviç Spiridonov, Cənub Federal Universiteti, Rusiya

T.e.d., prof. İsmayıl Mahmud oğlu İsmayilov

T.e.d., prof. Əhəd Xanəhməd oğlu Cənəhmədov

T.e.d., prof. Pərviz Şahmurad oğlu Abdullayev

F.-r.e.d., prof. Kərim Rəhim oğlu Allahverdiyev

T.e.d., prof. Xəqani İmran oğlu Abdullayev

F.-r.e.d., prof. Kamal Əsgər oğlu Əsgərov

T.e.d., prof. Nazim Şəkər oğlu Hüseynov

T.e.d., prof. Aytac Nəzif qızı Bədəlova

F.-r.e.n., prof. İslam Əsəd oğlu İsgəndərov

T.e.n., dos. Elman Mehdi oğlu Nəcəfov

T.e.n., dos. Fuad Həsən oğlu Dadaşov

Hüquq elmləri

H.e.d., prof. Ayxan Xankişi oğlu Rüstənzadə (redaktor)

Prof. Dr. Cavid Sədulla oğlu Abdullazadə, Ankara Universiteti, Türkiyə

Prof. Dr. Yener Ünver, Özyeğin Universiteti, Türkiyə

Prof. Dr. Ömer Çınar, İbn Haldun Universiteti, Türkiyə

H.e.d., prof. Nazim Həsən oğlu Cəfərli

H.e.d., prof. Sübhan Fərmayıl oğlu Əliyev

H.e.d. Fərdin Yaşar oğlu Xəlilov

H.e.d., dos. Rauf Məmməd oğlu Qarayev

İqtisad elmləri

İ.f.d., dos. Gulnarə Telman qızı Əhmədova (redaktor)

İ.e.d., prof. Heydər Sərdar oğlu Həsənov

İ.e.d., prof. Rustem Tursunoviç Yuldaşev, Moskva Dövlət Beynəlxalq Münasibətlər İnstitutu,

Rusiya İ.e.d., prof. Səlim Yanvar oğlu Müslümov

İ.e.d., prof. Sərvər Alıcan oğlu Abbasov

İ.e.d., prof. Elnur Məhəmməd oğlu Sadıqov

İ.e.n., dos. Fəridə Fərid qızı Ələkbərova

İ.f.d., dos. Vəfa Qurban qızı Nəcəfova

"Elmi Məcmuə"nin bölmələri: aviasiya və raket-kosmik texnikası, aeronaviqasiya, aviasiya təhlükəsizliyi, aviasiya meteorologiyası, aerokosmik monitoring və ətraf mühitin qorunması, cihazqayırma, radioelektronika, telekommunikasiya, informasiyanın emalı, nəqliyyat logistikası, fizika, bərk cisim elektronika, materialşünaslıq, informasiya texnologiyaları, sistemli analiz, idarəetmə sistemləri, tədrisin metodologiyası, hüquq, iqtisadiyyat, menecment, ictimai elmlər.

"Elmi məcmuə" 1999-cu ildə Azərbaycan Respublikası Mətbuat və İnformasiya nazirliyində qeydiyyatdan keçmişdir (Qeyd. № 492).

Jurnal Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının "Azərbaycan Respublikasında məqalələrin dərc olunması tövsiyə edilən dövrü elmi nəşrlərin siyahısı"na daxildir.

Redaksiyanın ünvanı: AZ1045, Bakı şəh., Mərdəkan pr. 30, Milli Aviasiya Akademiyası

Tel. (+994) 12 497 28 24. E-mail: em@naa.edu.az Veb sayt: <https://scientific-journals.naa.edu.az/>



aak.gov.az
<https://aak.gov.az>

I JOURNALS
MASTER LIST



UDC: 621.452.3.022:514.8

DOI: 10.30546/EMNAA.2026.02.28.101

**PARAMETRIC GEOMETRY CONTROL OF AN AERO-ENGINE FAN BLADE USING
A BEZIER-BASED MEAN CAMBER LINE**

Samadov A.S., Ramazanova F.N.

National Aviation Academy

The aerodynamic efficiency of advanced fan stages of aircraft engines in transonic mode is determined by geometric profiling factors. Specifically, it depends on the distribution of profile curvature. Camber-line distribution has a direct effect on flow acceleration, shock position, pressure recovery, and loading distribution along the chord. This paper presents a parametric geometry-control method for fan blade profiles. The mean camber line is described by a fifth-order Bezier curve, while the thickness law is generated using monotonic cubic Hermite interpolation (PCHIP). This combination provides smooth profile construction and avoids non-physical oscillations in the thickness distribution. This allows the chordwise aerodynamic loading to be redistributed in a controlled manner. The thickness is applied in the normal direction to the camber line, which preserves geometric consistency of the upper and lower blade surfaces. The method was tested through numerical simulation of a transonic fan stage. The results show a stable flow pattern, controlled acceleration on the suction side, and gradual pressure recovery downstream of the peak-velocity region. The computed total pressure ratio is 1.36, while the isentropic efficiency reaches 0.88. These results confirm that the proposed parameterization can be used as a reliable basis for further aerodynamic optimization of fan blade geometries. The method also makes it possible to evaluate the practical effect of local curvature changes on the flow structure.

Keywords: Fan blade, Bezier curve, PCHIP, profile parametrization, aerodynamic efficiency.

PCHIP - Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial

MDO - Multidisciplinary Design Optimization

SBLI - Shock Boundary Layer Interaction

CAD - Computer-Aided Design

CFD - Computational Fluid Dynamics

1. Introduction

The aerodynamic performance of high-bypass ratio fan stages is fundamentally governed by the structure of transonic flow within the blade passage [1]. In such regimes, the interaction between the shock wave and the boundary layer (shock–boundary layer interaction, SBLI) represents a major source of both wave and profile losses, directly affecting overall efficiency. The position and strength of the shock system are highly sensitive to the local camber distribution of the blade profile [2, 3]. Accurate prediction of these effects requires advanced design approaches based on high-fidelity Navier–Stokes solvers, particularly at the initial profiling stage [4].

The aerodynamic loading of a cascade is commonly characterized by the diffusion factor [5], which reflects the degree of flow deceleration and the tendency toward boundary layer separation.

The curvature of the mean camber line governs the streamwise pressure gradient and circulation, thereby controlling local diffusion levels. As a result, modifying the camber line provides a direct means of redistributing aerodynamic loading along the chord. This capability is particularly important in modern multidisciplinary design optimization (MDO) frameworks, where geometric parameters must be both compact and physically interpretable [6-8]. Traditional analytical airfoil definitions, such as the NACA family [9], offer limited flexibility for localized control of camber under transonic conditions. In response, more flexible representations based on Bezier curves and NURBS have been developed [10-12]. However, despite their geometric versatility, the relationship between control point manipulation and the underlying physics of SBLI and diffusion remains insufficiently formalized.

Recent research in transonic fan design has focused on three-dimensional features, such as blade sweep and lean, to mitigate shock-related losses [13,14]. Optimization strategies based on adaptive Gaussian processes and multi-zone parametrization have demonstrated improved efficiency through detailed control of thickness and curvature distributions [15,16]. Nevertheless, many of these approaches rely on data-driven optimization procedures, which limits physical interpretability and direct control of aerodynamic loading.

In this study, a parametric method for fan blade geometry control is proposed and validated against classical transonic benchmarks [17]. The method employs a fifth-order Bezier representation of the mean camber line combined with an independently defined thickness distribution. This formulation establishes a direct link between control point positions, metal angles, and the streamwise loading distribution. The approach is designed to support physically interpretable, high-efficiency designs and can be integrated into multi-point optimization frameworks [18].

2. Methodology

2.1. Parametric representation of the mean camber line

The airfoil geometry is constructed based on a parametric description of the mean camber line, defined by a fifth-order Bezier curve. The choice of a fifth-order polynomial is motivated by the need to ensure sufficient flexibility in the curvature distribution while maintaining a compact set of design variables [12,19].

The mean camber line is represented in parametric form as:

$$c(t) = \sum_{k=0}^5 P_k B_k^5(t), \quad t \in [0,1], \quad (1)$$

Where, $P_k = (P_{x,k}, P_{y,k})$ - control points, $B_k^5(t)$ - represents the fifth-order Bernstein basis polynomials, defined as:

$$B_k^5(t) = \binom{5}{k} (1-t)^{5-k} t^k \quad (2)$$

This representation ensures analytical continuity of the first and second derivatives throughout the parametric segment. Such continuity is of fundamental importance in preventing artificial curvature discontinuities and localized flow disturbances, which are particularly critical in transonic flow regimes.

Figure 1 illustrates the parametric mean camber line constructed using a fifth-order Bezier curve. The geometry is defined by six control points that form the control polygon, which uniquely determines the curve's shape and its differential characteristics.

The inlet and outlet metal angles are directly established by the first and last segments of the control polygon. These segments correspond to the tangent directions of the fifth-order Bezier curve.

The positions of the initial and final control points (P0 and P5) fix the coordinates of the leading edge (LE) and trailing edge (TE), respectively. The adjacent control points (P1 and P4) define the inlet and outlet metal angles via the tangents to the mean camber line:

$$\tan \beta = \frac{dy/dt}{dx/dt} \quad (3)$$

The inlet and outlet angles are directly established by the orientation of the first and last segments of the control polygon, requiring no additional geometric constraints. This representation ensures rigorous control over the metal angle boundary conditions.

Consequently, varying the positions of the internal control points (P1 through P4) allows for precise management of the curvature distribution and the subsequent redistribution of the aerodynamic loading along the chord.

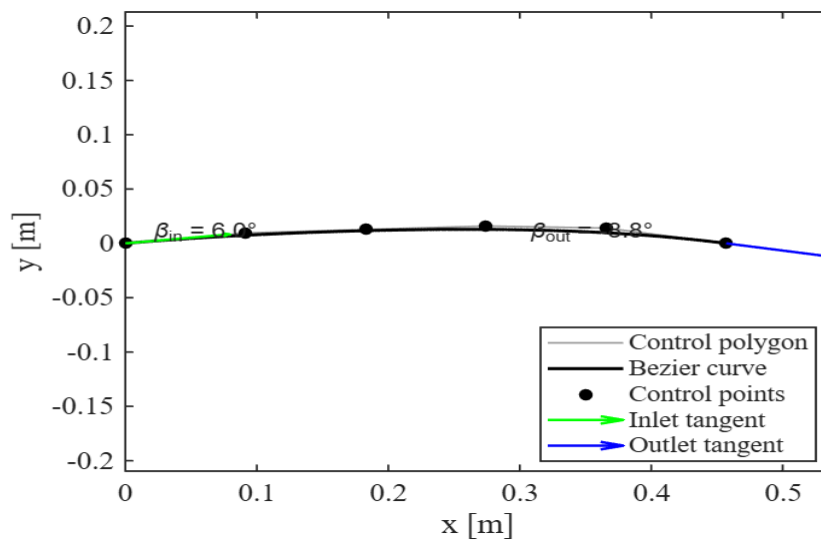


Figure 1. Bezier Mean Camber Line with Inlet and Outlet Angles

2.2. Thickness distribution and surface generation

The airfoil thickness is defined independently of the mean camber line as a function $h(x)$, specified at discrete nodes along the chord. To ensure smoothness and eliminate unstable oscillations, Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomials (PCHIP) are employed, as they preserve the shape and monotonicity of the original data.

The complete geometry of the suction (upper) and pressure (lower) surfaces is constructed by offsetting the half-thickness along the unit normal to the mean camber line. The tangent vector is defined as:

$$\mathbf{c}'(t) = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt} \right), \quad (4)$$

The tangent vector $\mathbf{c}'(t)$ is utilized to define the local orientation of the profile. The unit normal vector $\mathbf{n}(t)$ is then calculated by a 90° rotation of the tangent:

$$\mathbf{n}(t) = \frac{1}{|c'(t)|} \left(-\frac{dy}{dt}, \frac{dx}{dt} \right) \quad (5)$$

The upper and lower surfaces of the airfoil are formulated as follows, [14]:

$$s_{upper}(t) = c(t) + \frac{h(x(t))}{2} \mathbf{n}(t) \quad (6)$$

$$s_{lower}(t) = c(t) - \frac{h(x(t))}{2} \mathbf{n}(t) \quad (7)$$

This approach ensures the geometric consistency of the surfaces and prevents smoothness violations the variations of design parameters.

2.3. Control of aerodynamic loading

The curvature distribution of the mean camber line exerts a direct influence on the streamwise circulation distribution and local velocity within the blade passage. Within the framework of classical turbomachinery theory, aerodynamic loading is characterized by the diffusion factor, which reflects the degree of flow deceleration and is closely associated with the risk of boundary layer separation.

Parametrization of the mean camber line via Bezier control points enables targeted loading redistribution along the chord. Varying the positions of the internal control points modifies the curvature distribution, leading to changes in the streamwise pressure gradient and the shock wave position in transonic flow regimes.

Consequently, the geometric parameters of the model acquire a physically interpretable character, allowing them to be effectively utilized as design variables in aerodynamic optimization procedures.

2.4. Numerical implementation

The geometric model is implemented within the MATLAB environment. The parameter t is discretized using a uniform grid, ensuring sufficient profile resolution for subsequent export into CAD/CFD systems. To maintain high numerical precision, the derivatives of the Bezier curve are calculated analytically based on the properties of the control point differences [19]:

$$c'(t) = 5 \sum_{k=0}^4 (P_{k+1} - P_k) B_k^4(t) \quad (8)$$

This analytical approach ensures numerical stability and completely eliminates truncation errors associated with finite-differences approximations. This is particularly vital for the accurate calculation of surface normal and curvature-dependent aerodynamic parameters.

The generated coordinates for the suction and pressure surfaces are used for subsequent 3D blade construction.

1. Results and Discussion

The resulting blade section geometry is presented in Figure 2. The profile is generated based on a mean camber line defined by a fifth-order Bezier curve (indicated by the cyan line). The suction side (black line) and pressure side (green line) are constructed by offsetting the local half-thickness along the normal direction to the mean camber line.

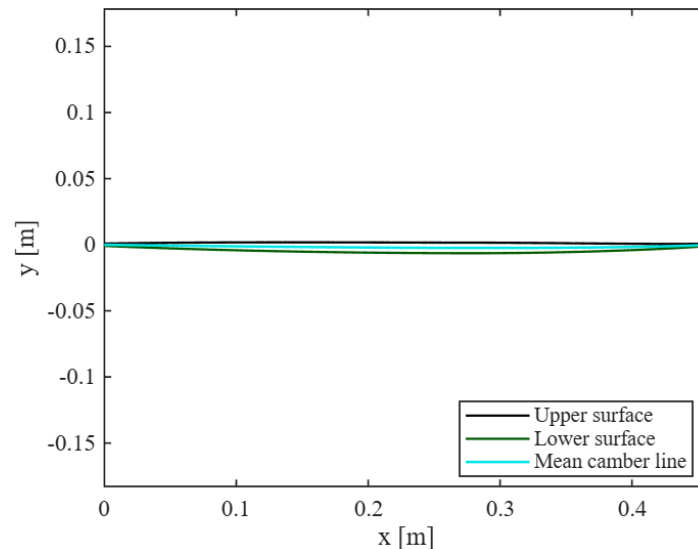


Figure 2. Bezier-based mean camber line parameterization and resulting blade section geometry (chord = 0.458 m)

The thickness distribution was interpolated from a set of predetermined discrete nodes using the PCHIP method, which was subsequently utilized to formulate the final suction and pressure surfaces relative to the central camber definition.

The generated geometry is characterized by a smooth curvature distribution and continuous first-derivatives, ensuring reliable subsequent CFD analysis. The point of maximum profile thickness is strategically positioned within the forward half of the chord, and the thickness monotonically decreases towards the trailing edge, forming a properly closed trailing edge geometry.

Decoupling curvature and thickness allow direct control of the streamwise loading. This is not possible with classical NACA definitions (Ladson et al., 1996), which impose fixed geometric relations. In contrast, the Bezier-based formulation provides a clear link between control point positions and flow characteristics. This includes the peak Mach number and sensitivity to SBLI. Similar advantages of spline-based parametrization have been reported in unified geometry approaches and optimization studies [10-12].

Figure 3 illustrates the velocity magnitude distribution and the flow vector field within the blade passage for the generated profile. The color scale indicates velocity variations ranging from 20 m/s to 600 m/s. In the leading-edge region, an intense flow acceleration is observed on the suction side, driven by the localized increase in the mean camber line curvature. Peak velocity values are concentrated within the first half of the chord, corresponding to the zone of maximum pressure differential.

The numerical results show that the fifth-order Bezier parametrization provides effective control of aerodynamic loading. The acceleration peak shifts toward the front part of the chord. This is followed by a stable pressure recovery. Such behavior indicates controlled diffusion levels within the blade passage. The resulting flow structure remains within the empirical limits reported by Lieblein et al [5]. It is also consistent with controlled diffusion concepts discussed by [2,3]. These features are essential for reducing losses in transonic stages [1,8].

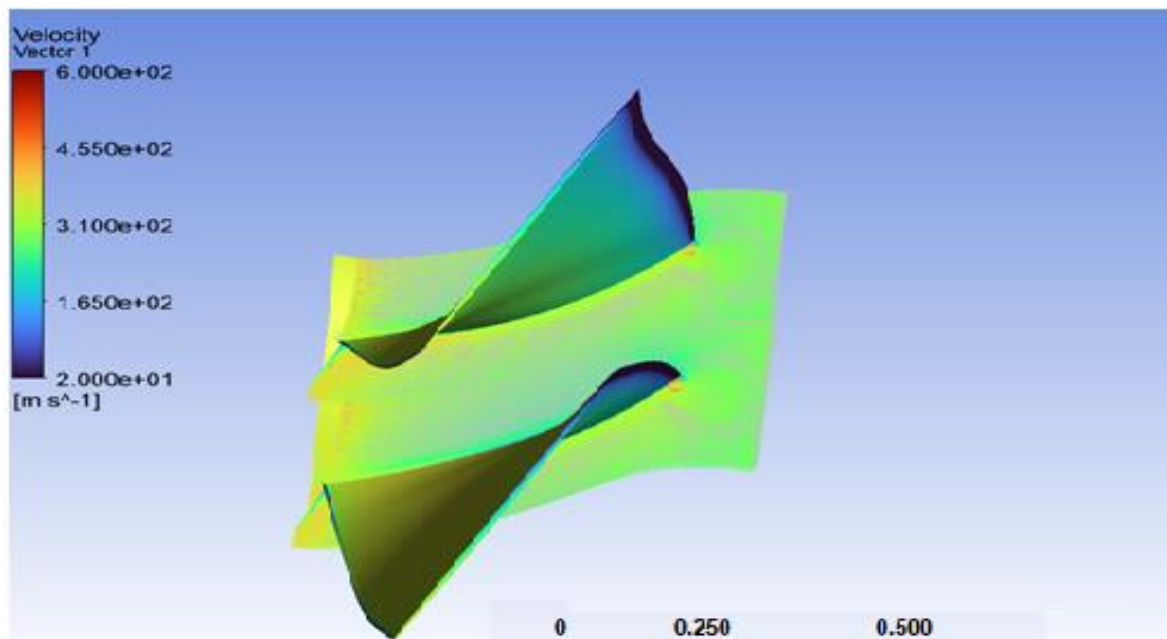


Figure 3. Velocity magnitude contours and vector flow structure within the blade passage

Crucially, the vector field confirms the absence of large-scale boundary layer separation or significant recirculation zones, even under high-load conditions. The flow remains well-attached along the entire blade surface, demonstrating a stable direction and moderate diffusion in the rear portion of the passage. The velocity distribution confirms the validity of the selected Bézier-based camber parametrization and the PCHIP-defined thickness distribution.

At the design point, the resulting geometry achieves a pressure ratio of 1.36 with a high isentropic efficiency of 0.88. These obtained performance values indicate a stable flow field with limited losses, which is consistent with the reported performance levels of modern transonic fan designs [13, 15]. In addition, the ability to fine-tune the thickness location and curvature distribution aligns with current multi-zone optimization strategies [16].

In conclusion, the combination of Bezier curves for the mean line and PCHIP interpolation for thickness allows for independent control over curvature and thickness distribution. By linking control point coordinates directly to transonic flow features, the proposed method provides a physically interpretable design framework. This significantly reduces the reliance on purely data-driven "black-box" optimization approaches [6, 18], as the geometric parameters retain a clear aerodynamic meaning and can be used as direct design variables. However, a quantitative comparison with baseline NACA-based geometries would further highlight the specific advantages of the proposed method.

2. Conclusion. A parametric method for fan blade geometry design is proposed. The mean camber line is represented by a fifth-order Bezier curve, with thickness defined independently using PCHIP. The approach links control point positions with inlet and outlet metal angles and the streamwise loading. Decoupling curvature and thickness allow stable and accurate profile generation.

Numerical results show that variations in the mean camber line curvature provide effective control of the peak acceleration region within the blade passage. The location and extent of this region can be adjusted through local curvature modifications, which directly influences the pressure recovery process and the distribution of diffusion along the chord. As a result, the aerodynamic loading can be

controlled in a predictable manner. The computed flow field corresponds to a stable transonic operating regime, with no signs of critical profile overloading. The solution remains free of large-scale separation and excessive shock-induced losses. A total pressure ratio of approximately 1.36 is achieved, while the corresponding isentropic efficiency reaches 0.88. These findings indicate that the Bezier-based parametrization captures the key features of high-speed flow behavior. In particular, it allows control of the shock wave position and limits its upstream migration. The method also reduces the effect of adverse pressure gradients, contributing to improved flow stability and aerodynamic performance.

Consequently, this method serves as an efficient tool for the profiling and optimization of fan stages in modern aircraft engines. The ability to link geometric variables directly to aerodynamic flow angles is particularly critical for transonic blade design, where performance is highly sensitive to localized curvature. By providing a transparent and physically interpretable design space, the proposed Bezier-PCHIP scheme offers a robust alternative to conventional optimization frameworks, facilitating the development of high-efficiency fan components with improved aerodynamic margins.

Future work will focus on extending the method to three-dimensional blade geometries and multi-operating conditions.

REFERENCES

1. Biollo, R., Benini, E. "Recent advances in transonic axial compressor aerodynamics". Progress in Aerospace Sciences. Vol. 56, 2013, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.05.002>
2. Denton, J. D. "Loss mechanisms in turbomachines". Journal of Turbomachinery. Vol. 115, Issue 4, 1993, pp. 621–656. <https://doi.org/10.1115/1.2929299>
3. Hall, K. C. "Analysis of shock motion in transonic compressor rotors". Journal of Turbomachinery. Vol. 123, Issue 3, 2001, pp. 482–490.
4. Rhie, C. M., Zacharias, R. M., Hobbs, D. E., et al. "Advanced transonic fan design procedure based on a Navier–Stokes method". Journal of Turbomachinery. Vol. 116, Issue 2, 1994, pp. 291–297. <https://doi.org/10.1115/1.2928363>
5. Lieblein, S., Schwenk, F. C., Broderick, R. L. "Diffusion factor for estimating losses and limiting blade loadings in axial-flow compressor blade elements". NACA Research Memorandum E53D01, 1953.
6. Idahosa, U. O., Golubev, V. V., & Balabanov, V. O. "An automated optimal design of a fan blade using an integrated CFD/MDO computer environment". AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference (AIAA 2006-6944), 2006. <https://doi.org/10.2514/6.2006-6944>
7. Ramazanova, F. N., Samadov, A. S. "Optimizing turbojet fan blades: Computational fluid dynamics (CFD) analysis of lean and sweep". International Sustainable Transportation Symposium (ISTRAS 2025). Baku, Azerbaijan. National Aviation Academy, 2025. <https://doi.org/10.71108/istras.2025>
8. Lauer, M. G., Ansell, P. J. "A review of parameterization methods for airfoil design". Progress in Aerospace Sciences. Vol. 158, 2025, 101140. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.-2025.101140>
9. Ladson, C. L., Brooks, C. W., et al. "Computer program to obtain ordinates for NACA airfoils". NASA Technical Memorandum 4741, 1996.

10. Agromayor, R., Anand, N., Müller, J.-D., et al. "A unified geometry parametrization method for turbomachinery blades". Computer-Aided Design. Vol. 133, 2021, 102987. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2020.102987>
11. Ayaz Ümütlü, H. C., Kırıl, Z. "Airfoil shape optimization using Bézier curve and genetic algorithm". Aviation. Vol. 26, Issue 1, 2022, pp. 32–40. <https://doi.org/10.3846/aviation.2022.16471>
12. Agarwal, D., Sahu, P. "A unified approach for airfoil parameterization using Bezier curves". Computer-Aided Design and Applications. Vol. 19, Issue 6, 2022, pp. 1130–1142. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2022.1130-1142>
13. Benini, E., Biollo, R. "Aerodynamics of swept and leaned transonic compressor-rotors". Applied Energy. Vol. 84, Issues 10–12, 2007, pp. 1012–1027. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.03.003>
14. Trépanier, J. Y., Lupien, A., et al. "A 3D parameterization for transonic fan blade multidisciplinary design". Aeronautics and Aerospace Open Access Journal. Vol. 1, Issue 1, 2017, pp. 42–55. <https://doi.org/10.15406/aaaj.2017.01.00004>
15. Luo, J., Fu, Z., Zhang, Y., et al. "Aerodynamic optimization of a transonic fan rotor by blade sweeping using adaptive Gaussian process". Aerospace Science and Technology. Vol. 137, 2023, 108255. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108255>
16. Qi, M., Li, X., Ren, X., et al. "Seven-zone parametric optimization method for compressor profile with controllable maximum thickness". Journal of Propulsion and Power, 2025. <https://doi.org/10.2514/1.B39515>
17. Castañeda, J., Mehdi, A., et al. "A preliminary numerical CFD analysis of transonic compressor rotors when subjected to inlet swirl distortion". Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, GT2011-46560. <https://doi.org/10.1115/GT2011-46560>
18. Qiu, S., Deng, X. "Multi-point design optimization of a high bypass ratio fan blade". 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2016). Daejeon, Korea, 2016.
19. Piegler, L., & Tiller, W. "The NURBS Book (2nd ed.)". Monographs in Visual Communication. Springer-Verlag, 1997. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59223-2>

AVIASIYA MÜHƏRRİKİ VENTİLYATOR PƏRİNİN BÉZİER ƏSASLI ORTA ƏYRİLİK XƏTTİ VASİTƏSİLƏ PARAMETRİK HƏNDƏSİ İDARƏ EDİLMƏSİ

Səmədov Ə.S., Ramazanova F.N.

Milli Aviasiya Akademiyası

Transonik rejimində işləyən aviasiya mühərriklərinin təkmilləşdirilmiş ventilyator pillələrinin aerodinamik səmərəliliyi profilləmənin həndəsi faktorları ilə müəyyən edilir. Xüsusilə, bu səmərəlilik profilin ayrılığının paylanmasıdır. Profil ayrılığının paylanması axının sürətlənməsinə, zərbə dalğasının mövqeyinə, təzyiqin bərpasına və yükün xorda boyu paylanmasına birbaşa təsir göstərir. Bu işdə ventilyator pərlərinin profillərinin həndəsəsini idarə etmək üçün parametrik metod təqdim olunur. Profilin orta ayrılığı beşinci dərəcəli Bezier ayrısı ilə təsvir edilir, qalınlıq qanunu isə monoton kubik Ermit interpolasiyası (PCHIP) vasitəsilə formalaşdırılır. Belə kombinasiya profilin rəvan qurulmasını təmin edir və qalınlıq paylanmasında qeyri-fiziki dalğalanmaların qarşısını alır. Bu, xorda boyu aerodinamik yükü idarə olunan şəkildə yenidən paylamağa imkan verir. Qalınlıq

profilin ayrılıyınə normal istiqamətdə tətbiq edilir ki, bu da pərlərin üst və alt səthlərinin həndəsi uyğunluğunu qoruyur. Metod transonik ventilyator pilləsinin ədədi modelləşdirilməsi vasitəsilə sınaqdan keçirilmişdir. Nəticələr sabit axın mənzərəsini, sovurma tərəfində idarəolunan sürətlənməni və pik sürət zonasından aşağıda təzyiqin tədricən bərpasını göstərir. Hesablanmış tam təzyiq nisbəti 1,36, izoentropik faydalı iş əmsalı ($FI\Theta$) isə 0,88 təşkil edir. Bu nəticələr təsdiq edir ki, təklif olunan parametrləşdirmə ventilyator pərlərinin həndəsəsinin gələcək aerodinamik optimallaşdırılması üçün etibarlı əsas ola bilər. Metod local ayrılık dəyişikliklərinin axın strukturuna praktiki təsirini qiymətləndirməyə də imkan verir.

Açar sözlər: : Ventilyator pəri, Bezier əyrisi, PCHIP, profilin parametrləşdirilməsi, aerodinamik səmərəlilik.

Information about the authors

Name, surname, fathers name	Workplace	Position, scientific degree, scientific name	Contact
Adalat Samadov Soltan	National Aviation Academy	Flight Equipment and Aviation Engines Department, Doctor of Technical Sciences, professor	samedov@naa.edu.az
Fatima Ramazanova Namik	National Aviation Academy	Flight Equipment and Aviation Engines Department, teacher	framazanova@naa.edu.az phone: (+994) 51 709-04-16

**REFINED CHEMICAL-EQUILIBRIUM COMBUSTION MODELING FOR
PROPULSION APPLICATIONS: NUMERICAL STABILIZATION, PHASE-BOUNDARY
TREATMENT, AND NOZZLE-DESIGN CONSEQUENCES**

Abdulla N.P.

National Aviation Academy

This article presents the principal results of a refined chemical-equilibrium combustion-modeling framework developed for jet and rocket propulsion applications. The work focuses on the numerical and thermodynamic reliability of a from-scratch equilibrium solver that follows the classical Gibbs-free-energy minimization philosophy of NASA CEA while introducing additional treatment for condensed phases, phase-boundary crossings, triple-point neighborhoods, and polymorphic phase selection. The most important results are grouped into four technical outcomes. First, gas-only verification against NASA CEA confirms that the PT, PH, and PS formulations reproduce reference equilibrium states with average relative errors of order $10^{-4}\%$ for representative H_2/O_2 and CH_4/O_2 combustion systems. Second, heterogeneous calculations show stable condensed-phase activation and agreement with NASA CEA at the sub-percent level, with the remaining discrepancies mainly associated with different conventions for heterogeneous internal-energy post-processing. Third, a phase-boundary module using composition-identical phase matching, inferred transition temperatures, coexistence tolerance, deterministic temperature snapping, and active-set augmentation resolves numerical oscillation near water solid-liquid coexistence and supports stable polymorph selection in metal-oxide systems. Fourth, coupling the refined equilibrium solver with a method-of-characteristics nozzle calculation changes the resulting RD-107 and RD-108 nozzle geometries in a physically interpretable way: both refined nozzles achieve the prescribed exit condition with larger initial turning, unchanged exit angle, shorter length, and smaller area ratio than the conventional fixed-property baseline. These results show that refined equilibrium modeling is not merely a post-processing improvement; it can directly alter propulsion-system geometry when thermochemical response is embedded into design calculations.

Keywords: Chemical Equilibrium Analysis, Gibbs Minimization, NASA CEA, Combustion Modeling, Condensed Phases, Triple Point, Polymorphism, Method of Characteristics, Rocket Nozzle.

1. Introduction

Chemical-equilibrium analysis remains one of the most widely used thermochemical tools in propulsion design because it converts a specified reactant state into the equilibrium composition, temperature, molecular weight, specific heat, isentropic exponent, and other mixture properties required by chamber, turbine, and nozzle calculations [7, 8]. In rocket propulsion, these outputs define characteristic velocity, throat state, nozzle expansion behavior, and the thermodynamic response of the exhaust products [5, 6, 9, 10, 18]. In air-breathing propulsion, they influence combustor-exit temperature, turbine inlet conditions, dissociation levels, pollutant precursors, and the thermal load environment [12]. Classical tools, especially NASA CEA, have therefore become reference points for both research and preliminary design [11, 16, 22, 23].

However, the practical use of equilibrium analysis in modern propulsion has become more demanding than the original gas-only formulation suggests [13]. High-pressure combustion,

hydrocarbon or oxygen-rich mixtures, extended species databases, condensed products, phase transitions, and near-degenerate polymorphic candidates can make the Gibbs-minimization problem numerically stiff. A solver may be thermodynamically correct in principle and still fail operationally if it oscillates at a phase boundary, incorrectly eliminates a condensed candidate, locks onto the wrong polymorph, or produces discontinuous outputs during a coupled design loop [17]. This is especially problematic when the equilibrium solver is no longer used as an isolated calculator but as a submodule inside nozzle generation, cycle analysis, CFD preprocessing, or multidisciplinary design optimization.

The research work on which this article is based addresses that problem by developing a Python-based equilibrium framework from scratch, using NASA-style thermodynamic data and a CEA-like constrained-minimization backbone, but with additional logic for robustness in heterogeneous and phase-sensitive regimes [1, 2, 3, 4]. The central contribution is not a replacement of classical chemical thermodynamics; it is the numerical refinement of how the equilibrium state is reached and how phase-sensitive thermodynamic admissibility is enforced. The framework supports PT, PH, and PS formulations, handles gaseous and condensed products through active sets, and implements specific mechanisms for (i) solid-liquid coexistence, (ii) triple-point capture, and (iii) polymorphic selection.

This article deliberately avoids repeating the full literature review of the research work. Instead, it concentrates only on the crucial results: the mathematical structure of the solver, the verification against NASA CEA, the treatment of condensed and phase-boundary cases, and the propulsion-level consequence demonstrated through RD-107 and RD-108 nozzle contour calculations. The purpose is to present the final scientific result in journal-article form: a refined equilibrium solver can remain consistent with NASA CEA in conventional gas-only regimes, remain stable in condensed and phase-transition regimes, and modify nozzle geometry when the resulting state-dependent thermodynamic properties are coupled to the method of characteristics.

2. Equilibrium Formulation and Computational Framework

For a reacting mixture containing η_s candidate species and ζ conserved elements, the equilibrium problem is formulated as a constrained minimization of the total Gibbs free energy,

$$G(T, p, \mathbf{N}) = \sum_{j=1}^{\eta_s} N_j \mu_j(T, p, \mathbf{N}) \quad (1)$$

subject to elemental conservation,

$$\sum_{j=1}^{\eta_s} \mathbf{A}_{ij} \mathbf{N}_j = \mathbf{B}_i^\circ \quad (2)$$

where $1 \leq i \in \mathbb{Z} \leq \zeta$, and non-negativity of all species amounts $\mathbf{N}_j \geq 0$, where $1 \leq j \in \mathbb{Z} \leq \eta_s$. Here $\mathbf{N}_j$ is the mole number of the j^{th} species, $\mathbf{A}_{ij}$ is the number of atoms of element i in species j , and $\mathbf{B}_i^\circ$ is the fixed elemental abundance of the mixture. For gaseous species, the chemical potential includes the ideal-mixture contribution; for condensed species, the activity treatment follows the standard equilibrium assumption used in CEA-type calculations, so condensed candidates are activated through phase stability rather than through a gas-mixture mole-fraction term.

The computational backbone follows the Lagrange-multiplier structure of classical CEA-type equilibrium analysis [16]. The stationarity condition can be written generically as

$$\mu_j + \sum_{i=1}^{\zeta} \lambda_i \mathbf{A}_{ij} = 0 \quad (3)$$

for active species, together with feasibility and non-negativity constraints, where λ_i represents the Lagrange multipliers and μ_j stands for the chemical potentials. In practice, the solver advances toward equilibrium by linearizing the nonlinear stationarity conditions, elemental conservation equations, and thermodynamic closure relations about the current iterative state. At each iteration, the nonlinear dependence of the chemical potentials on temperature, pressure, and species mole numbers is approximated by a first-order correction system. This system is then solved for the unknown increments in the species amounts, the elemental Lagrange multipliers, and, when the problem is formulated under PH or PS constraints, the temperature correction required to satisfy the prescribed enthalpy or entropy. In this way, the equilibrium problem is transformed locally into a coupled linear algebraic system whose solution simultaneously improves chemical stationarity, restores elemental balance, and drives the mixture toward the required thermodynamic state. The PT formulation treats pressure and temperature as prescribed, while PH and PS introduce temperature as an unknown and impose enthalpy or entropy closure, respectively, as

$$H(T, p, \mathbf{N}) = H_0 \quad \text{and} \quad S(T, p, \mathbf{N}) = S_0 \quad (4)$$

This common KKT-type backbone allows the same code structure to solve fixed-temperature, fixed-enthalpy, and fixed-entropy equilibrium problems.

Several implementation details are essential to the reported results. First, thermodynamic properties are evaluated from NASA-style polynomial intervals, including specific heat, enthalpy, entropy, and standard-state chemical potential. Second, species and phase data are parsed into structured product sets, allowing gaseous, liquid, solid, and polymorphic candidates to be filtered and activated consistently. Third, trace species are protected by logarithmic or multiplicative updates so that positivity is maintained without destroying the convergence path. Fourth, when a linear solve becomes singular or ill-conditioned, a pseudoinverse fallback is used to preserve progress. This fallback is not intended as the main numerical method; it is a safeguard for degenerate active-set configurations and phase-boundary events.

The most important refinement concerns condensed phases. A classical gas-only minimization can be smooth, but a heterogeneous equilibrium calculation is inherently discontinuous in the set of admissible products. A condensed species may be absent for most of the iteration and then become thermodynamically stable when its reduced Gibbs residual crosses the activation threshold. The solver therefore treats condensed products through an active-set strategy: candidates are admitted, removed, or replaced depending on phase stability and thermodynamic admissibility. This is the technical foundation for the phase-boundary and polymorphism results discussed later.

3. Gas-Only Verification Against NASA CEA

The first verification level avoids condensed-phase complications. The purpose is to isolate the thermodynamic-property pipeline, elemental conservation, KKT iteration, and PT/PH/PS closure behavior. Two propellant systems are used: H_2/O_2 at an oxidizer-to-fuel ratio of 5.50 and pressure of 200 bar, and CH_4/O_2 at an oxidizer-to-fuel ratio of 3.40 and pressure of 100 bar. PT cases prescribe

temperature, PH cases solve for the equilibrium temperature at fixed pressure and enthalpy, and PS cases solve for the equilibrium temperature at fixed pressure and entropy (Table 1).

Table 1

Gas-Only Verification Cases Used for NASA CEA Comparison

Case	Propellant	O/F	Pressure	Temperature	Entropy
PT-1	H ₂ /O ₂	5.50	200 bar	3500 K	–
PT-2	CH ₄ /O ₂	3.40	100 bar	3200 K	–
PH-1	H ₂ /O ₂	5.50	200 bar	–	–
PH-2	CH ₄ /O ₂	3.40	100 bar	–	–
PS-1	H ₂ /O ₂	5.50	200 bar	–	S_{PT-1}
PS-2	CH ₄ /O ₂	3.40	100 bar	–	S_{PT-2}

The central result is that the developed solver reproduces NASA CEA gas-only results with very low average relative error. The average relative errors reported for PT-1, PT-2, PH-1, PH-2, PS-1, and PS-2 are given on Figure 1.

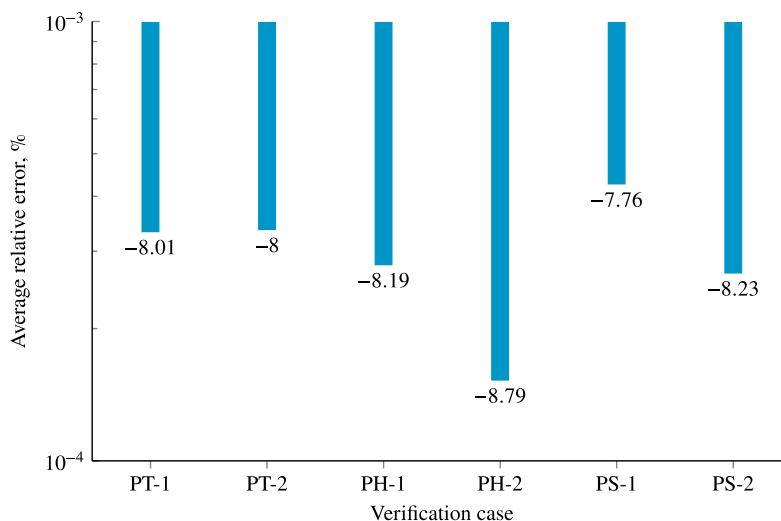


Figure 1. Average Relative Error of Gas-Only Equilibrium Cases Relative to NASA CEA

The importance of this gas-only verification is primarily methodological. If the refined solver had shown noticeable disagreement with NASA CEA in simple gas-only regimes, any later improvement observed in condensed or phase-sensitive calculations would be difficult to interpret and could not be attributed with confidence to the new phase-handling logic. Instead, the gas-only tests establish a necessary baseline for the entire framework. They confirm that the thermodynamic-property parser, species database treatment, elemental composition matrix, Gibbs free-energy minimization procedure, and PH/PS temperature-coupling strategy are consistent with the established reference implementation. This means that the solver first reproduces the standard equilibrium problem before additional heterogeneous refinements are introduced. Consequently, the condensed-phase, triple-point, and polymorphic extensions can be interpreted as genuine improvements built on an already validated equilibrium core, rather than as compensatory numerical adjustments concealing deficiencies in the base gas-phase calculation.

4. Condensed-Phase Verification and Heterogeneous Equilibrium

The second verification level extends the comparison with NASA CEA to systems containing condensed products. These cases are more demanding than gas-only calculations because the active species set is no longer fixed throughout the iteration. A condensed phase may remain absent during the early stages of the solution and become thermodynamically stable only after the gas-phase composition, temperature, and chemical potentials approach equilibrium. Once activated, the condensed species modifies the composition vector, changes the dimensionality of the active equilibrium system, and influences the thermodynamic closure used in PT, PH, or PS calculations. In addition, condensed products contribute to mixture enthalpy, entropy, heat capacity, and internal energy in a manner that depends on how gaseous and condensed contributions are post-processed. For this reason, heterogeneous verification is not only a test of equilibrium composition, but also a test of active-set stability and thermodynamic-property consistency (Table 2).

Table 2

Heterogeneous Verification Cases Used for NASA CEA Comparison

Case	Propellant	O/F	Pressure	Temperature	Entropy
CPT-1	H ₂ /O ₂	5.50	200 bar	500 K	–
CPT-2	CH ₄ /O ₂	3.40	100 bar	500 K	–
CPH-1	H ₂ /O ₂	0.40	200 bar	–	–
CPH-2	CH ₄ /O ₂	0.10	100 bar	–	–
CPS-1	H ₂ /O ₂	2.00	200 bar	–	$S_{\text{CPT-1}}$
CPS-2	CH ₄ /O ₂	0.10	100 bar	–	$S_{\text{CPT-2}}$

The numerical solution reports condensed-phase verification across CPT, CPH, and CPS formulations. The average relative errors for these heterogeneous cases remain low (see Figure 2).

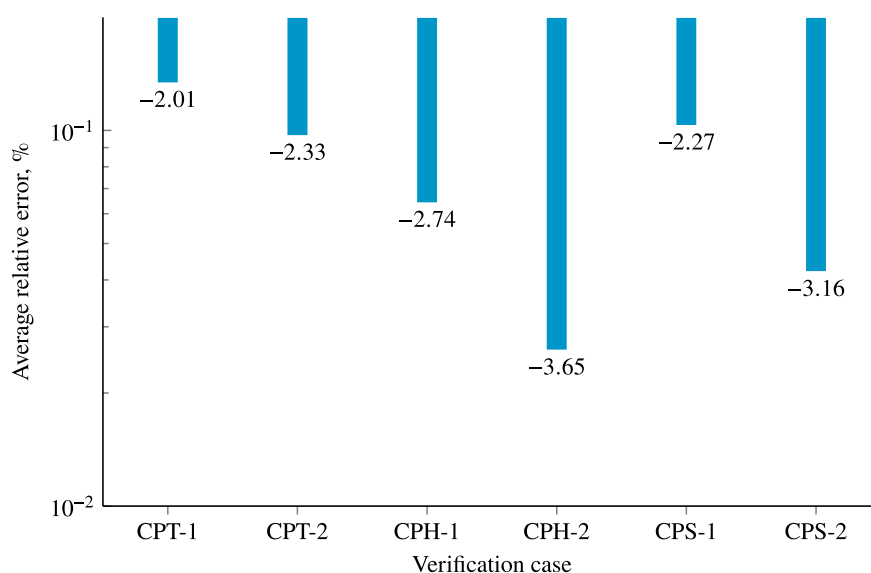


Figure 2. Average Relative Error of Heterogeneous Equilibrium Cases Relative to NASA CEA

Although these values are larger than the gas-only errors, they are still small for a heterogeneous equilibrium comparison. More importantly, the research work identifies the source of

much of the discrepancy: NASA CEA and the developed solver use different heterogeneous internal-energy post-processing conventions. NASA CEA evaluates heterogeneous internal energy using **an ideal-gas relation** of the form $e = h - RT$ for the gas contribution, whereas the developed implementation computes internal energy **by summing gaseous and condensed contributions directly**. Thus, the remaining difference is not primarily a failure of equilibrium composition prediction; it is largely a convention-dependent difference in derived thermodynamic-property reporting.

The main conclusion from the condensed-phase verification is that the active-set treatment is consistent. Condensed species appear without destroying elemental conservation, gas species redistribute in a physically interpretable way, and the solver remains convergent under CPT, CPH, and CPS constraints. This result is critical because the later triple-point and polymorphism tests depend on a reliable condensed-phase mechanism. Without stable activation and deactivation of condensed candidates, any attempt to handle solid-liquid coexistence would become an arbitrary species-filtering procedure rather than a thermodynamic refinement.

5. Phase-Boundary Handling and Triple-Point Stabilization

The most original part of the research work is the treatment of phase boundaries and triple-point neighborhoods. Classical equilibrium solvers can be highly sensitive when the iteration crosses a temperature at which two composition-identical phases exchange thermodynamic stability [20]. A naive implementation may alternate repeatedly between solid and liquid entries, lose data validity because a selected phase is outside its polynomial temperature interval, or converge to a state that is numerically stable but physically inconsistent [14].

The developed phase-boundary module begins by identifying composition-identical candidates. Species are compared by elemental atom vectors so that, for example, liquid water and crystalline water are recognized as different phase representations of the same chemical composition. Once such a family is detected, the solver examines phase labels and NASA polynomial validity ranges to infer the relevant transition temperature. For a solid-liquid pair, this temperature is interpreted as the melting or coexistence boundary, denoted T_m .

The key refinement is not merely recognizing the boundary. It is defining how the iteration behaves near it. The algorithm introduces a coexistence tolerance ϵ , implemented as `triplePointTolerance`. Away from the tolerance band, a single-phase rule is enforced: the solid phase is selected if $T < T_m - \epsilon$ and the liquid phase is selected if $T > T_m + \epsilon$. Inside the tolerance band

$$|T - T_m| \leq \epsilon \quad (5)$$

the solver enters a coexistence regime. The coexisting phase is added to the condensed set, the detector flag is activated, and the iterated temperature is snapped deterministically to the transition temperature $T \leftrightarrow T_m$.

This procedure transforms a stiff numerical crossing into a controlled thermodynamic event. Instead of repeatedly overshooting the boundary and switching phase identities, the solver recognizes that both composition-identical phases are admissible at the coexistence point. Elemental feasibility is preserved because replacing a phase by another phase of identical formula does not change the stoichiometric matrix. Thermodynamic consistency is preserved because the active phase is always evaluated within the correct polynomial interval (Table 3).

The water solid-liquid benchmark is the clearest demonstration. The state is forced toward

$T = 273.15$ K, and the solver is tested for its ability to admit gaseous H_2O , liquid $^{(L)}\text{H}_2\text{O}$, and crystalline $^{(CR)}\text{H}_2\text{O}$ consistently.

Table 3

Decision Logic for Solid-Liquid Coexistence Handling

Operation	Computational Role
Composition Matching	Identifies Species with Identical Elemental Atom Vectors
Phase Differentiation	Separates Gas, Liquid, Solid, and Polymorphic Candidates
Boundary Inference	Uses Temperature-Validity Intervals to Infer T_m or Analogous Phase-Transition Point
Single-Phase Selection	Selects Stable Phase When $ T - T_m > \epsilon$
Coexistence Activation	Admits Both Composition-Identical Phases When $ T - T_m \leq \epsilon$
Temperature Snapping	Sets $T = T_m$ Inside Coexistence Band to Prevent Repeated Boundary Crossing

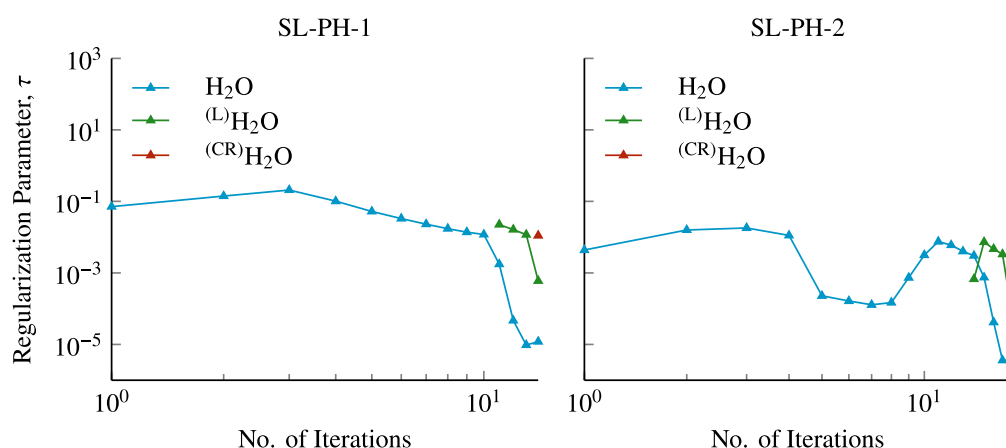


Figure 3. Solid-Liquid Coexistence Cases: Water Inclusion

Figure 3 shows that near convergence, liquid water appears progressively, and the crystalline phase is admitted when the final iteration reaches the coexistence neighborhood. The physically important result is not that all phases are present in arbitrary amounts; it is that the solver reaches the coexistence condition without nonphysical phase flip-flop and terminates at a thermodynamically admissible phase-boundary state – chemical state of H_2O is preserved [15, 19].

The tolerance ϵ is therefore interpreted as a phase-boundary capture radius in temperature space rather than as an arbitrary numerical relaxation factor. If ϵ is too small, the iteration can repeatedly cross the boundary without recognizing coexistence, causing oscillation and slow convergence. If it is too large, coexistence may be activated far from the actual boundary, artificially enlarging the multiphase region and biasing the equilibrium composition. The practical selection of ϵ must therefore be tied to the thermochemical-table segmentation, the local curvature of the thermodynamic properties near the boundary, and the typical damped temperature correction produced by the PH or PS update.

6. Polymorphic Phase Selection

Polymorphism introduces a related but distinct problem. In this case, the candidate phases are not simply solid and liquid forms of the same composition; they are different crystalline structures of a chemically identical solid. Their free energies may be very close, and the stable polymorph may change over a narrow temperature interval. A solver that does not explicitly recognize composition-identical polymorphic families can lock onto an incorrect solid candidate or retain a metastable form beyond its temperature range.

The research work evaluates this issue using a metal-bearing equilibrium system containing multiple Cr_2O_3 polymorphs. A set of temperature-sweep cases, denoted as TP-MET-250, TP-MET-308, TP-MET-312, and TP-MET-350, is used to examine how the active condensed phase changes as the thermodynamic state approaches and crosses the polymorphic transition region. In these cases, the competing condensed candidates possess the same elemental composition but correspond to different solid-phase representations in the thermodynamic database. The refined solver therefore first identifies composition-identical condensed species, then evaluates their phase admissibility, temperature-validity intervals, and relative thermodynamic consistency at the current iterative state. Based on this information, the algorithm selects the polymorph that is consistent with the local temperature range and suppresses the continued use of an inadmissible phase entry. This procedure prevents the so-called “polymorph locking” behavior, in which a solver may remain attached to an initially selected condensed phase even after the temperature has moved into a region where another polymorph should be active. As a result, the equilibrium solution remains both numerically stable and physically consistent across the transition interval.

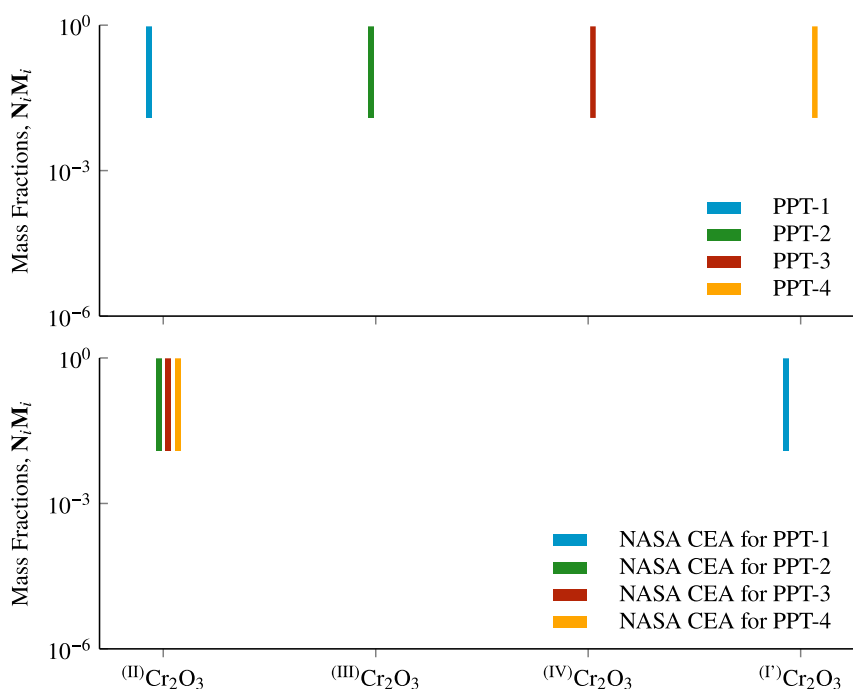


Figure 4. Polymorphic Transition Cases: Species Mass Fractions

Figure 4 summarizes the temperature-dependent polymorph selection for Cr_2O_3 across the PPT sweep by reporting the equilibrium mass fraction associated with each solid form. The present implementation exhibits consistent phase selection: each temperature point activates a single Cr_2O_3

polymorph as the thermodynamically stable condensed form, with the same total Cr_2O_3 mass fraction (0.01218) preserved while the identity of the stable polymorph changes across the sweep. In contrast, the NASA CEA results in the same figure indicate that the reference solution may identify the $^{(1)}\text{Cr}_2\text{O}_3$ entry as the stable form for the PPT-1 condition, but then report $^{(1)}\text{Cr}_2\text{O}_3$ for the remaining temperatures, **effectively fixing the polymorph selection** rather than transitioning consistently as the stability ordering changes with T . The present solver, on the other hand, avoids this artifact by enforcing **explicit polymorph resolution** during condensed-phase activation and by applying temperature-interval validity checks for adjacent solid entries, ensuring that the active condensed form corresponds to the stable Cr_2O_3 polymorph at each temperature. Consequently, the observed polymorph switching in the present results reflects controlled, stability-driven solid-solid transitions rather than a hard-coded or database-order-dependent selection.

The scientific importance of this result lies in the relationship between discrete phase identity and continuous equilibrium convergence. A Gibbs-minimization solver can converge mathematically while still selecting an inadmissible phase representation if the thermodynamic database contains multiple entries for the same formula. The developed logic addresses this by adding a layer of phase-family reasoning above the numerical minimization. The optimization problem is not allowed to choose freely among physically incompatible entries; it must respect the database-implied phase boundary.

For propulsion applications, this matters whenever condensed metal oxides, carbon phases, soot-like products, alumina, or other solids can appear. Even if their total mass fraction is small, their presence can influence heat capacity, molecular weight of the gas phase, nozzle erosion assessment, thermal radiation estimates, and downstream property reporting. Polymorphic consistency therefore improves not only the numerical stability of the equilibrium solver but also the physical interpretability of heterogeneous combustion products.

7. Numerical Stabilization: Damping, Active Sets, and Robust Linear Algebra

The reported results are also supported by general numerical-stabilization mechanisms. The iteration applies damping to species and temperature updates, protecting the solver from excessive Newton corrections when the Gibbs surface is flat or when active-set changes introduce discontinuities. For gaseous species, logarithmic or multiplicative updates preserve positivity, preventing the iteration from stepping into nonphysical negative mole numbers. For PH and PS cases, temperature updates are similarly controlled so that enthalpy or entropy closure is approached without destabilizing the phase-selection logic.

The active-set strategy is central. Condensed species are not permanently included with arbitrary amounts, because doing so would inflate the dimensionality and increase degeneracy. Instead, candidates are introduced when their reduced Gibbs residual indicates thermodynamic stability and removed when they become inadmissible or inactive. This approach balances completeness and efficiency: the solver can discover condensed products without solving a large, permanently active heterogeneous system at every iteration.

The pseudoinverse fallback is another safeguard. Near phase coexistence, the coefficient matrix can become singular or ill-conditioned because multiple phases of identical composition create nearly dependent directions in composition space. A direct linear solve may fail even though a physically meaningful equilibrium state exists. The fallback allows the iteration to continue through such local degeneracy. Since it is invoked only when the standard solve fails, it does not dominate normal performance, but it is important for robustness in boundary-dominated cases.

These stabilization mechanisms are not independent additions. Their interaction is what makes the refined solver reliable. Damping prevents violent crossing of boundaries; the active set controls candidate admission; the phase-boundary module defines admissibility; and the pseudoinverse handles occasional algebraic degeneracy. The combined effect is a solver that retains CEA-like behavior in smooth gas-only regimes while becoming more reliable in the discontinuous regimes where classical equilibrium calculations are most fragile.

8. Coupling Equilibrium Results to Nozzle Design

The final engineering demonstration is the coupling of equilibrium-computed thermodynamic properties to method-of-characteristics nozzle contour generation. In a conventional nozzle design, properties such as γ , molecular weight, and sound speed may be treated as fixed or simplified. In a reacting hydrocarbon/oxygen expansion, however, dissociation and recombination alter the local thermodynamic response from the chamber through the throat to the exit. Since the MOC compatibility relations depend on local Mach angle, sound speed, flow turning, and isentropic response, a fixed-property approximation can bias the characteristic net.

The refined workflow supplies station-dependent equilibrium properties to the MOC calculation. The nozzle wall is then generated using thermodynamic response that varies consistently with the reacting mixture. This is not a minor numerical substitution. It changes the turning distribution and the area development required to reach the same exit pressure.

The RD-107 and RD-108 are used as engine-level cases to couple the present chemical equilibrium solver with the MOC nozzle design framework. For RD-107, the analysis is performed for RP-1/O₂(L) at 58.5 bar chamber pressure, 0.39 bar exit pressure, and mixture ratio 2.4726; for RD-108, the corresponding conditions are 51.0 bar, 0.33 bar, and 2.3914 [21]. The equilibrium solution provides the state-dependent mixture properties required for contour refinement, and the resulting nozzles are shorter and less over-expanded than the conventional fixed-property designs.

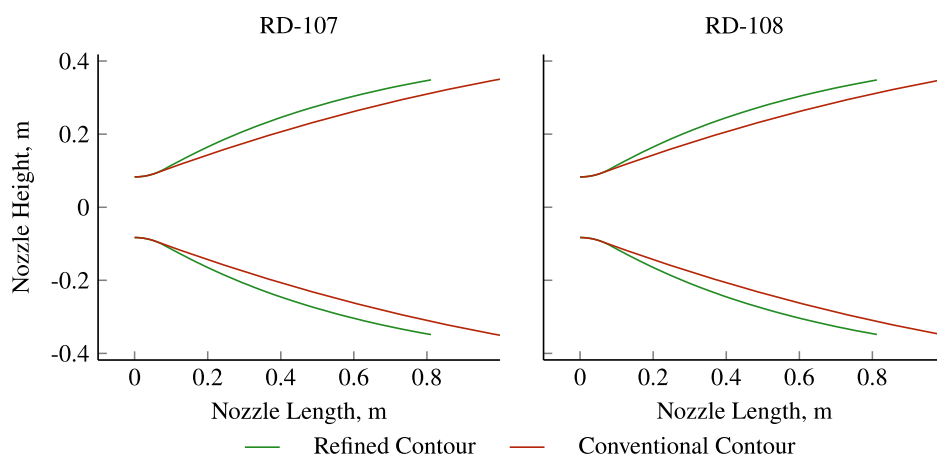


Figure 5. RD-107/108: Nozzle Contour Comparison

Figure 5 shows that for RD-107, the refined contour follows a more front-loaded turning schedule and reaches the target exit condition with reduced axial development. In geometric terms, the refined nozzle increases the initial expansion angle from 20.0000° to 28.6180°, shortens the contour from 1.056 m to 0.8112 m, and reduces the area ratio from 18.8580 to 17.6710. For RD-

108, the refined contour departs from the conventional profile mainly in the downstream turning region and achieves the required expansion with a shorter geometry. Quantitatively, the initial expansion angle increases from 20.0000° to 28.5661° , the nozzle length decreases from 1.056 m to 0.8123 m, and the area ratio decreases from 18.8580 to 17.6420. These results indicate that coupling the MOC formulation with equilibrium consistent thermochemistry produces more compact and physically consistent nozzle shapes for both RD-107 and RD-108.

9. Discussion

The results show three levels of contribution. The first is verification: the developed solver agrees with NASA CEA in standard gas-only equilibrium calculations. This is essential because NASA CEA remains the practical reference for equilibrium combustion analysis in many aerospace workflows [16, 22]. Agreement at the $10^{-4}\%$ level in average relative error indicates that the framework correctly implements the core equilibrium machinery.

The second contribution is robustness in regimes where classical equilibrium solvers can become fragile. The treatment of condensed species, solid-liquid coexistence, triple-point neighborhoods, and polymorph selection directly addresses numerical pathologies that occur because phase identity is discrete while temperature, pressure, and composition are continuous iteration variables. The use of composition matching, boundary inference, coexistence tolerance, and temperature snapping gives the solver a deterministic response to phase-boundary crossing. This is particularly valuable for PH and PS problems because temperature is not prescribed; it is found iteratively and may naturally approach a phase boundary during convergence.

The third contribution is engineering consequence. The nozzle-design examples show that equilibrium modeling affects geometry when coupled to a design method. A fixed-property or simplified thermodynamic model may still produce a smooth nozzle contour, but it can require extra length or area growth to satisfy the same exit target. In both RD-107 and RD-108 cases, the refined contour is shorter by about 23% and uses an area ratio about 6 – 6.5% lower than the conventional baseline. These values are large enough to matter in practical propulsion design, especially where nozzle length, mass, packaging, cooling, and manufacturing constraints are important.

The results also clarify what the framework does not claim. It does not replace finite-rate kinetics where reaction-rate history is important. It does not eliminate the need for CFD in resolving mixing, boundary layers, shock structures, or multidimensional heat transfer. It also does not imply that all deviations from NASA CEA are errors in NASA CEA or in the developed solver. Some deviations arise from different property-reporting conventions, especially for heterogeneous internal energy. The correct interpretation is narrower and stronger: for equilibrium-dominated design calculations, a solver that is both CEA-consistent and phase-boundary-aware can produce more stable and physically interpretable thermochemical inputs for propulsion design.

Conclusions. A refined chemical-equilibrium combustion-modeling framework has been developed and evaluated for propulsion applications. The most important conclusions are as follows.

First, the solver reproduces NASA CEA gas-only equilibrium benchmarks for H_2/O_2 and CH_4/O_2 systems across PT, PH, and PS formulations, with average relative errors of order $10^{-4}\%$. This confirms the correctness of the thermodynamic-property parser, elemental conservation structure, Gibbs-minimization backbone, and temperature-coupled closure equations. Second, the solver remains accurate in heterogeneous equilibrium calculations. Condensed-phase verification errors remain low, and the larger discrepancies relative to gas-only cases are explained mainly by differences in heterogeneous internal-energy post - processing rather than by incorrect equilibrium

composition. Third, the phase-boundary module provides a physically consistent mechanism for solid-liquid coexistence and triple-point stabilization. Composition-identical phase recognition, inferred transition temperatures, coexistence tolerance, active-set augmentation, and deterministic temperature snapping prevent nonphysical phase flip-flop and preserve admissibility near T_m . Fourth, the polymorph-selection logic prevents the solver from retaining a temperature-inconsistent condensed form when multiple solid entries share the same composition. This is essential for metal-oxide and other condensed combustion products where polymorphic transitions can occur over narrow temperature intervals. Fifth, coupling the refined equilibrium solver to MOC nozzle generation demonstrates a direct propulsion-design effect. The results demonstrate that equilibrium-consistent thermochemistry can materially change nozzle geometry when it is embedded into the characteristic-net calculation.

Overall, the research work demonstrates that the refinement of combustion modeling should be understood not only as improved agreement in thermochemical tables, but as increased reliability of the entire propulsion-design workflow. A robust equilibrium solver must reproduce reference gas-phase results, handle condensed and phase-sensitive states without numerical ambiguity, and provide state-dependent properties that can be used directly in geometry-generating calculations. The developed framework satisfies these requirements and establishes a practical basis for future integration with cycle analysis, CFD preprocessing, nozzle optimization, and multidisciplinary propulsion-system design.

REFERENCES

1. Abdulla, N.P. (2026). *CEA-Thermochemical-Analysis* [E-repository]. GitHub. <https://github.com/nijatabdulla/CEA-Thermochemical-Analysis/tree/main>
2. Abdulla, N.P. (2026). *CEADatabase.dat* [E-database]. GitHub. <https://github.com/nijatabdulla/CEA-Thermochemical-Analysis/blob/main/CEADatabase.dat>
3. Abdulla, N.P. (2026). *CEAEngine.py* [Source code]. GitHub. <https://github.com/nijatabdulla/CEA-Thermochemical-Analysis/blob/main/CEAEngine.py>
4. Abdulla, N.P. (2026). *CEAPlugins.py* [Source code]. GitHub. <https://github.com/nijatabdulla/CEA-Thermochemical-Analysis/blob/main/CEAPlugins.py>
5. Abdulla, N. (2022, September 18-22). *Numerical investigation of combustion equilibrium in thrust chambers of liquid rocket engines*. International Astronautical Congress 2022, Paris, France. <https://dl.iafastro.directory/event/IAC-2022/paper/68767/>
6. Abdulla, N. (2023, October 2-6). *Toolkit for liquid rocket propulsion system design*. International Astronautical Congress 2023, Baku, Azerbaijan. <https://dl.iafastro.directory/event/IAC-2023/paper/77794/>
7. Abdulla, N., & Abdullayev, P. (2019). The LRE design system using a new thermo-gas-dynamic calculation method. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 12(2), 171-183. <https://jast.msu.edu.tr/index.php/JAST/article/view/378>
8. Abdulla, N., & Abdullayev, P. (2019). To the question of the thermodynamic design of the LRE chamber. *Aerospace Technic and Technology*, 28-38. <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.8.05>
9. Abdulla, N., & Abdullayev, P. (2021, September 8-10). *The concept for liquid rocket engine system design*. 11th Ankara International Aerospace Conference, Ankara, Türkiye. <https://aiac.ae.metu.edu.tr/paper.php/AIAC-2021-123>
10. Abdulla, N., & Abdullayev, P. (2023). The generalized tensor model for numerical

- investigation of combustion and flow processes in liquid rocket engine chamber. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 16(1), 15-40. <https://jast.msu.edu.tr/index.php/JAST/article/view/514>
11. Cantera Developers. (n.d.). *Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes* [Software]. <https://cantera.org/>
 12. Cha, J. (2023). Numerical simulation of chemical propulsion systems: Survey and fundamental mathematical modeling approach. *Aerospace*, 10(10), 839. <https://doi.org/10.3390/aerospace10100839>
 13. Chi, Z., Ji, Y., Liu, N., Jiang, T., Liu, X., & Zhang, W. (2025). Algorithms for Solving the Equilibrium Composition Model of Arc Plasma. *Entropy*, 27(1), 24. <https://doi.org/10.3390/e27010024>
 14. dos Santos Junior, J. M., dos Reis, L. P., Vidotti, A. D. S., de Freitas, A. C. D., Mariano, A. P., & Guirardello, R. (2025). Thermodynamic Modeling of Low-Temperature Fischer–Tropsch Synthesis: A Gibbs Free Energy Minimization Study for Hydrocarbon Production. *Processes*, 13(8), 2373. <https://doi.org/10.3390/pr13082373>
 15. Dziubek, K. F. (2022). On the definition of phase diagram. *Crystals*, 12(9), 1186. <https://doi.org/10.3390/cryst12091186>
 16. Gordon, S., & McBride, B. J. (1994). *Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications. Part 1: Analysis* (NASA Reference Publication 1311; NASA-RP-1311; E-8017). National Aeronautics and Space Administration. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950013764>
 17. Herranz, M., Benito, J., Foteinopoulou, K., Karayiannis, N. C., & Laso, M. (2023). Polymorph Stability and Free Energy of Crystallization of Freely-Jointed Polymers of Hard Spheres. *Polymers*, 15(6), 1335. <https://doi.org/10.3390/polym15061335>
 18. Hossain, M. A., Morse, A., Hernandez, I., Quintana, J., & Choudhuri, A. (2024). Liquid Rocket Engine Performance Characterization Using Computational Modeling: Preliminary Analysis and Validation. *Aerospace*, 11(10), 824. <https://doi.org/10.3390/aerospace11100824>
 19. Industrial Refrigeration Consortium. (n.d.). *Fluid property calculator*. <https://irc.wisc.edu/properties/>
 20. Kastanidis, P., Romanos, G. E., Stubos, A. K., Pappa, G., Voutsas, E., & Tsimpanogiannis, I. N. (2024). Evaluation of a Simplified Model for Three-Phase Equilibrium Calculations of Mixed Gas Hydrates. *Energies*, 17(2), 440. <https://doi.org/10.3390/en17020440>
 21. Kravchenko, D. G., Aniskevich, Y. V., & Labanova, A. M. (2018). *RD-107 engine system*. Baltic State Technical University “Voenmekh”.
 22. National Aeronautics and Space Administration. (n.d.). *Chemical equilibrium with applications* [Software]. NASA Glenn Research Center. <https://www.nasa.gov/glenn/research/chemical-equilibrium-with-applications/>
 23. Rocket Propulsion Software+Engineering UG. (n.d.). *Rocket propulsion analysis* [Software]. <https://www.rocket-propulsion.com/index.htm>

***HƏRƏKƏT SİSTEMLƏRİNƏ TƏTBİQLƏR ÜÇÜN TƏKMİLLƏŞDİRİLMİŞ KİMYƏVİ
TARAZLIQ ƏSASLI YANMA MODELLEŞDİRİLMƏSİ: ƏDƏDİ SABİTLƏŞDİRMƏ, FAZA
SƏRHƏDİNİN NƏZƏRƏ ALINMASI VƏ SOPLO LAYİHƏLƏNDİRİLMƏSİ NƏTİCƏLƏRİ***

Abdulla N.P.

Milli Aviasiya Akademiyası

Bu məqalədə hava-reaktiv və raket mühərrik sistemlərinə tətbiq üçün işlənib hazırlanmış təkmilləşdirilmiş kimyəvi tarazlıq əsaslı yanmanın modelləşdirilməsinin əsas nəticələri təqdim olunur. İş NASA CEA proqramının klassik Gibbs sərbəst enerjisinin minimallaşdırılması fəlsəfəsini

izləyən, lakin kondensasiya olunmuş məhsullar, aqreqat halı sərhədlərinin keçilməsi, üçlü nöqtə ətrafı oblastlar və polimorf aqreqat halı seçimi üçün əlavə yanaşmalar daxil edən sıfırdan hazırlanmış tarazlıq həlledicisinin ədədi və termodinamik etibarlılığına yönəlmişdir. Əsas nəticələr dörd texniki istiqamət üzrə qruplaşdırılmışdır. Birincisi, NASA CEA ilə aparılmış yalnız qaz fazalı yoxlama göstərir ki, PT, PH və PS formulalaşdırmaları xarakterik H_2/O_2 və CH_4/O_2 yanma sistemləri üçün istinad tarazlıq hallarını orta nisbi xəta baxımından $10^{-4}\%$ tərtibində təkrarlayır. İkincisi, heterogen hesablamalar kondensasiya olunmuş məhsulların stabil aktivləşməsinə və NASA CEA ilə subfaiz səviyyəsində uyğunluğu göstərir; qalan fərqlər əsasən heterogen daxili enerjinin sonrakı emalı üçün tətbiq olunan müxtəlif konvensiyalarla əlaqələndirilir. Üçüncüsü, tərkibcə eyni aqreqat hallarının uyğunlaşdırılması, keçid temperaturlarının çıxarılması, koeksistensiya tolerantlığı, deterministik temperatur uyğunlaşdırılması və aktiv çoxluğun genişləndirilməsinə əsaslanan aqreqat halı sərhədi modulu suyun bərk-maye koeksistensiyası yaxınlığında ədədi osillyasiyaları aradan qaldırır və metal-oksid sistemlərində sabit polimorf seçimini təmin edir. Dördüncüsü, təkmilləşdirilmiş tarazlıq həlledicisinin xarakteristikalar metoduna əsaslanan soplo hesablaması ilə birləşdirilməsi RD-107 və RD-108 soplolarının alınan həndəsəsini fiziki baxımdan izah oluna bilən şəkildə dəyişir: hər iki təkmilləşdirilmiş soplo ənənəvi sabit-xassəli baza variantı ilə müqayisədə daha böyük başlanğıc dönmə bucağı, dəyişməz çıxış bucağı, daha qısa uzunluq və daha kiçik sahə nisbəti ilə verilmiş çıxış şərtini təmin edir. Bu nəticələr göstərir ki, təkmilləşdirilmiş tarazlıq modelləşdirilməsi yalnız sonrakı emal mərhələsində aparılan düzəliş deyil; termokimyəvi reaksiya dizayn hesablamalarına daxil edildikdə, o, mühərrik sisteminin həndəsəsini birbaşa dəyişdirə bilər.

Açar sözlər: Kimyəvi Tarazlıq Analizi, Gibbs Minimallaşdırılması, NASA CEA, Yanma Modelləşdirilməsi, Kondensə Olunmuş Məhsullar, Üçlü Nöqtə, Polimorfizm, Xarakteristikalar Metodu, Raket Soplosu.

Information about the author

Name, surname, fathers name	Workplace	Position, scientific degree, scientific name	Contact
Abdulla Nijat Parviz	National Aviation Academy, Flight Vehicles Development Laboratory, Department of Flight Vehicles and Aviation Engines	Principal Propulsion Systems Engineer, Senior Instructor	nijatabdulla@naa.edu.az

UDC: 631.3:004.8:681.5:631.4

DOI: 10.30546/EMNAA.2026.02.28.123

***A REAL-TIME AI-DRIVEN AGRICULTURAL ROVER INTEGRATING PLANT
DISEASE DETECTION AND GEO-REFERENCED SOIL MOISTURE ANALYSIS***

Gasimov V.A., Dadashov F.H., Hasanov H.B., Huseynov N.E.

National Aviation Academy

This paper presents an autonomous agricultural ground robot for real-time monitoring of plant health and soil moisture in large-scale crop fields. The proposed system integrates a deep learning-based perception subsystem with autonomous navigation and a custom ground control station (GCS) to enable continuous and geo-referenced field analysis. Visual data are acquired using an onboard camera and processed in real time on a Raspberry Pi using an object detection model (ODM) to identify disease-related visual symptoms such as discoloration, deformation and leaf degradation. Each detected instance is associated with a confidence score and accurately geo-tagged using GPS data.

In parallel, a contact-based soil moisture sensor performs localized measurements at fixed spatial intervals along a grid-based coverage trajectory. All perception outputs are synchronized with navigation data and transmitted via a telemetry link to the GCS where live video with detection overlays, rover trajectory, mission status and sensor telemetry are visualized and logged for post-mission analysis.

Field experiments conducted under real operating conditions demonstrate stable autonomous operation and achieve an overall plant disease detection accuracy of 85-90%, confirming the effectiveness of the proposed system for precision agriculture applications.

Keywords: *agriculture, mobile robotic system, YOLO algorithm, image analysis, soil moisture sensing, autonomous field monitoring.*

1. Introduction

The increasing demand for agricultural productivity under climate variability has intensified the need for intelligent and automated monitoring solutions [1]. In large scale farming environments, manual inspection of crop health and soil conditions remains time-consuming, labor intensive and insufficient for early detection of plant diseases and spatial soil variability, leading to inefficient resource utilization and yield losses.

Early identification of plant diseases and accurate assessment of soil moisture distribution are among the key challenges in precision agriculture [2]. Visual symptoms such as discoloration or wilting often remain unnoticed during conventional inspections while heterogeneous soil moisture conditions directly affect crop growth and irrigation efficiency [3]. These challenges highlight the need for autonomous, real-time, and location-aware monitoring systems.

Recent advances in mobile robotics and artificial intelligence have enabled ground-based platforms to perform real-time agricultural monitoring. In particular, deep learning-based object detection algorithms such as the You Only Look Once framework have demonstrated high efficiency in real-time visual analysis under outdoor conditions [4]. However, many existing agricultural

monitoring systems either rely on offline image processing or lack an integrated GCS interface for real-time mission supervision and data visualization [5].

The rover type platform employs an onboard computer (OC) executing Python-based vision algorithms, achieving real-time detection of diseased plants with an average accuracy of 85-90%. Soil moisture conditions are assessed through an onboard sensor at selected field locations. Autonomous navigation is performed using ArduPilot rover firmware while mission planning, monitoring and data visualization are managed through the custom GCS interface.

Experimental results confirm that the proposed system reliably detects plant health anomalies and low moisture soil regions while providing real-time visual feedback and precise geographic coordinates. By combining autonomous ground mobility, real-time deep learning-based image analysis and integrated soil sensing within a unified framework, this work contributes to efficient and scalable solutions for precision agriculture.

Purpose of the study. The aim of this study is to develop and experimentally evaluate an autonomous agricultural ground robot for real-time monitoring of plant health and soil moisture in large-scale crop fields. The proposed system integrates ODM-based visual disease detection with geo-referenced soil moisture sensing and autonomous navigation. A GCS employed to support mission execution, real-time visualization and data logging. The overall objective is to provide a practical and scalable solution for precision agriculture applications.

2. Related work

Deep learning approaches based on convolutional neural networks are widely used for plant disease identification from visual data [2, 4, 6, 7]. These methods demonstrate high accuracy under controlled and semi-controlled conditions and are capable of distinguishing between healthy and diseased plants based on leaf texture, color variation and structural deformation.

Recent studies have focused on object detection models such as the ODM family to enable real-time detection in field environments [8, 9]. Lightweight architectures have been proposed to allow deployment on embedded platforms, balancing inference speed and detection accuracy [10]. However, performance is often affected by changing illumination, occlusions, background clutter, and plant growth stages [11].

Mobile robotic systems have been increasingly adopted for agricultural monitoring, scouting and harvesting tasks [12, 13]. Rover offer advantages over aerial platforms in terms of payload capacity, energy efficiency and proximity-based sensing. Autonomous navigation in agricultural fields has been implemented using waypoints tracking, grid coverage strategies, and terrain aware control systems [14, 15]. However, GPS precision, uneven terrain and dynamic obstacles such as vegetation or humans often limit navigation accuracy.

Soil moisture and environmental parameter sensing play a critical role in precision irrigation and crop management [16]. Both static sensor networks and mobile sensing approaches have been explored for capturing spatial variability of soil conditions [17]. Mobile platforms equipped with soil probes or contact sensors allow higher spatial resolution and targeted measurements compared to fixed sensor deployments [18]. Nevertheless, challenges remain in terms of sensor calibration, soil heterogeneity and integration with navigation and mapping subsystems.

Several integrated systems combining robotics, sensing and artificial intelligence have been proposed [5, 19]. These systems aim to automate crop scouting, detect stress indicators and support decision-making processes. Despite these advancements many existing solutions rely on offline data processing, lack real-time supervision interfaces, or do not provide tight integration between

perception, navigation and data visualization layers [20]. This limits their applicability in time critical and large scale agricultural operations.

In contrast, the proposed system integrates real-time ODM-based image analysis, onboard soil moisture sensing, autonomous rover navigation and a custom GCS into a unified and scalable monitoring framework.

3. System overview

The proposed system is a ground-based autonomous agricultural rover for real-time plant health monitoring and soil moisture analysis using AI and onboard sensors. It integrates autonomous navigation, visual perception and a custom Python-based GCS for efficient field monitoring.

The wheeled rover measures $80 \times 70 \times 50$ cm and weighs 8 kg, powered by battery, providing up to 60 minutes of operation. It reaches speeds up to 8.5 m/s, enabling rapid coverage of large areas. The mechanical design modeled in SolidWorks, ensures stability on uneven terrain.

Computation is handled by a OC running Python-based image processing. Motion control uses ArduPilot with bidirectional communication via telemetry module. Operation modes include autonomous, manual and return to launch (RTL). ODM processes visual data in real time to detect diseased plants. Video is also stored locally for offline analysis.

Soil moisture is measured via an onboard analog sensor and transmitted to the GCS for location-specific analysis. The GCS visualizes video streams, coordinates, telemetry, rover status, real-time position on a digital map, mission trajectories, and operational modes, enabling comprehensive supervision of field operations. Figure 1 illustrates the functional architecture of the proposed system showing the interaction between the perception, navigation and ground control subsystems.

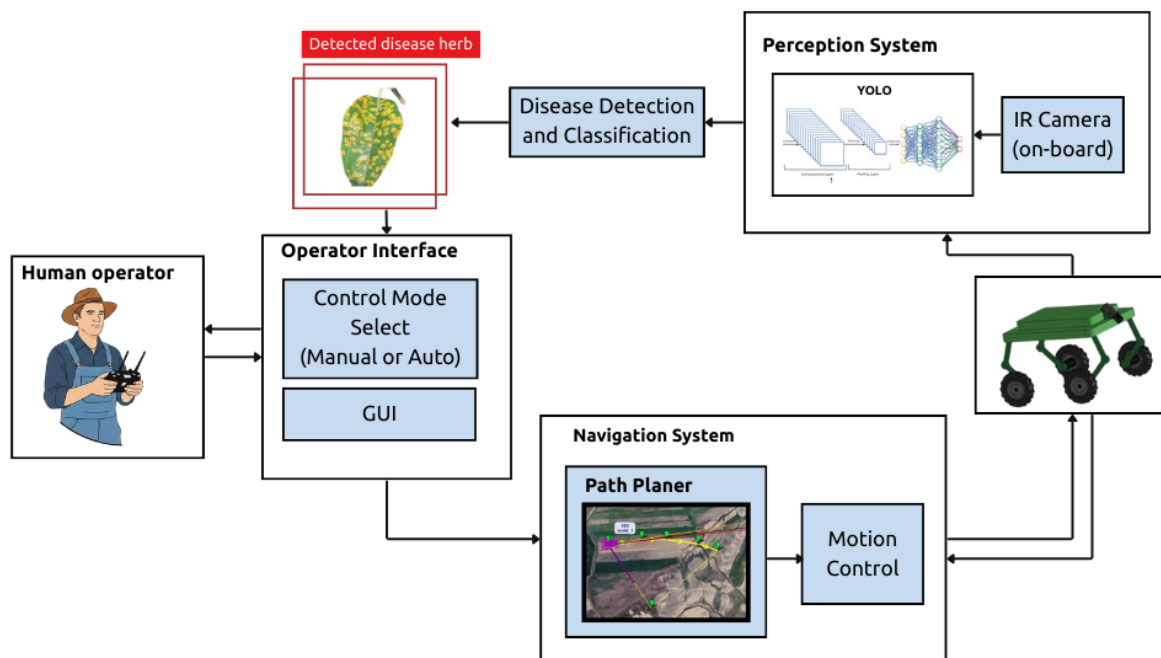


Figure 1. Functional architecture of the proposed AI-based autonomous agricultural rover system

Ground control and navigation

The ground control and navigation subsystem is designed to support both manual and autonomous operation of the intelligent agricultural rover. A custom developed GCS, implemented

in Python using the Tkinter framework, provides real-time monitoring, mission planning, and bidirectional communication with the robot via communication protocol (CP).

The system supports a maximum communication range of up to 40 km under line of sight conditions, with a transmission rate of 276 kbps. CP heartbeat messages are continuously exchanged to ensure link integrity and enable failsafe triggering in case of communication loss. Telemetry data are received and parsed using the pymavlink library. The GCS displays comprehensive real-time system information, including coordinates, distance from the home position, heading, ground speed, battery voltage and current, active operating modes (Auto, Manual, RTL), satellite count, and soil moisture sensor readings. Compass and gyroscope states are visualized through intuitive graphical indicators, enabling rapid assessment of system stability. All telemetry data are logged throughout operation and stored in text format for post-mission analysis [21].

Navigation and localization are performed using a GNSS receiver integrated with the ArduPilot. Sensor fusion is handled by the default ArduPilot extended kalman filter, combining GPS and IMU measurements. Positioning accuracy reaches approximately 2.5 m under standard 3D FIX conditions and improves to approximately 0.025 m with Real-time kinematic corrections. Wheel encoders are not employed in the current system configuration. Autonomous navigation is executed in Auto mode based on pre-defined waypoint missions generated within the GCS map interface. The rover follows a grid-based trajectory optimized for systematic agricultural field coverage. RTL failsafe is automatically triggered by the ArduPilot in the event of telemetry link loss or when battery capacity drops below 20% ensuring safe return to the home location.

Process algorithm and software scalability

Realtime perception and decision making are handled OC, which executes both image processing and data fusion tasks. Visual data are acquired through a camera and streamed to the GCS via the RTSP protocol, while simultaneously being processed locally. ODM-based deep learning model is deployed for real-time plant disease detection. The model identifies visual symptoms such as leaf yellowing, deformation and leaf drop. Detection results are rendered as bounding boxes overlaid on the live video stream, with infected plants highlighted using red frames and associated confidence scores displayed in real time.

The average end to end processing latency, including image acquisition, inference and visualization, is approximately 120-150 ms, which is sufficient for real-time agricultural monitoring applications. In parallel with live processing, all video data are stored locally on the OC to enable offline analysis and model retraining. Geospatial data visualization within the GCS is implemented using OpenStreetMap. The rover's real-time position, planned waypoints, and executed trajectory are dynamically updated during operation. All telemetry, sensor, and navigation data are continuously logged while trajectory information is stored in formats suitable for both 2D replay within the GCS and 3D visualization during post-processing. The modular software architecture enables scalability in both perception and control layers. This design ensures adaptability of the proposed system to larger agricultural fields and more complex monitoring tasks. The mission execution and decision-making algorithm illustrated in Figure 2.

The mission starts with system initialization, where the operation area, movement speed, trajectory and minimum battery capacity are defined. The rover continuously monitors its battery level and proceeds with autonomous navigation only if the battery capacity is above the safety threshold. During motion along the planned trajectory, real-time image data are processed using a ODM-based detection algorithm to identify diseased plants. If no disease is detected, the rover continues its trajectory while transmitting telemetry data to the GCS.

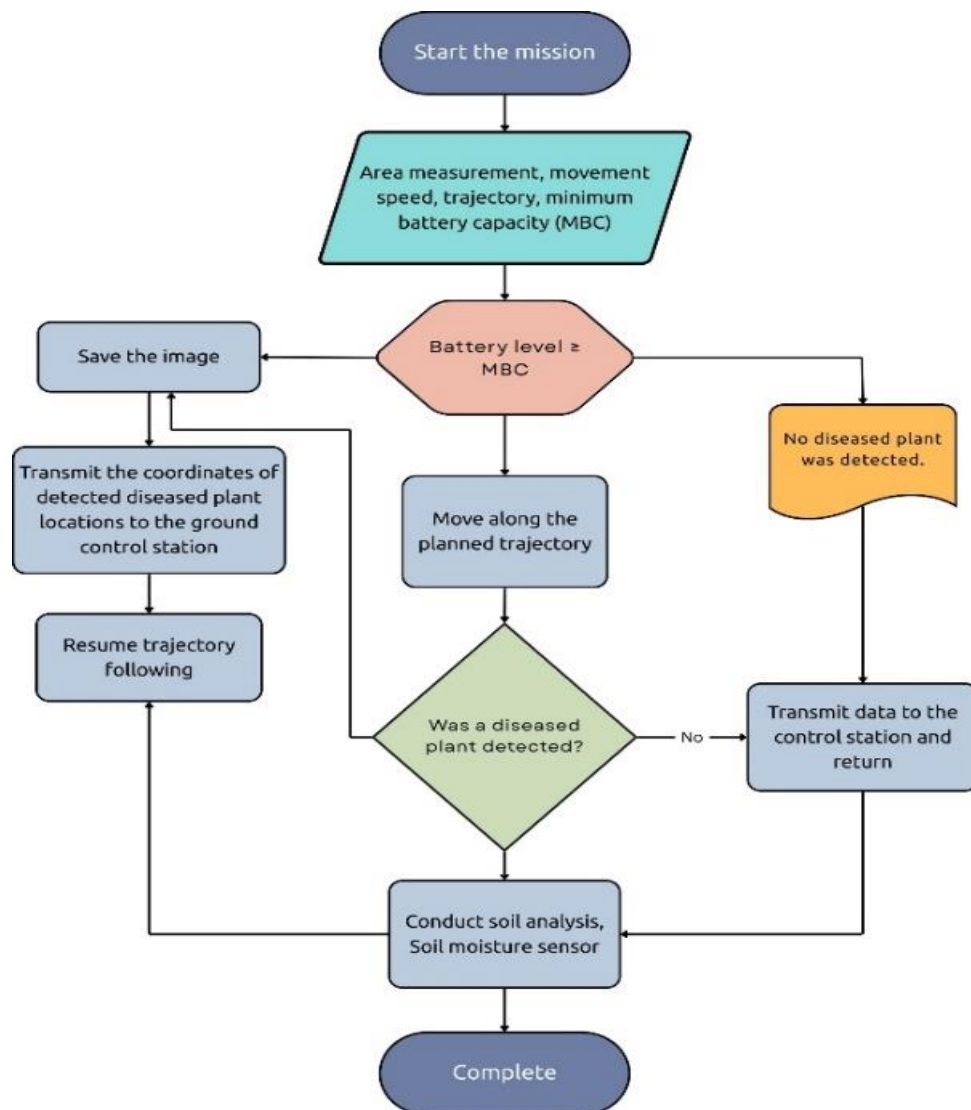


Figure 2. Mission execution algorithm of an autonomous agricultural rover

When a diseased plant is detected, the system saves the corresponding image, transmits the geographic coordinates to the GCS and performs local soil moisture analysis. After completing data acquisition and transmission, the rover resumes its predefined path.

The mission continues iteratively until the survey is completed or the battery level drops below the safe threshold at which point the system finalizes data transmission and terminates the mission.

3D Mechanical design and structural analysis of the mobile robot

The rover platform was designed and assembled in SolidWorks using a hybrid material structure combining an aluminum chassis with 3D printed PLA components. Aluminum was selected for the main load bearing elements to ensure structural strength and durability while PLA parts were used for sensor mounts and auxiliary components to support modular integration and rapid prototyping. The mechanical design supports a maximum payload of 10 kg and incorporates 20 cm diameter wheels with a high ground clearance of 70 cm, enabling reliable operation over uneven and rough agricultural terrain. The overall platform dimensions and geometric configuration are illustrated in Figure 3 (a). The real model of rover demonstrated in Figure 3 (b).

Structural validation was performed through simulation-based stress analysis within the SolidWorks environment under maximum payload and dynamic motion conditions. The analysis

indicates a maximum equivalent stress below 85 MPa remaining well within the allowable limits of the selected aluminum alloy. Although suspension is not included in the current prototype, the wheel configuration and elevated clearance provide sufficient stability for field operation. The resulting mechanical architecture ensures both rough-terrain capability and modular sensor integration, forming a robust foundation for autonomous navigation, real-time perception, and scalable system upgrades.

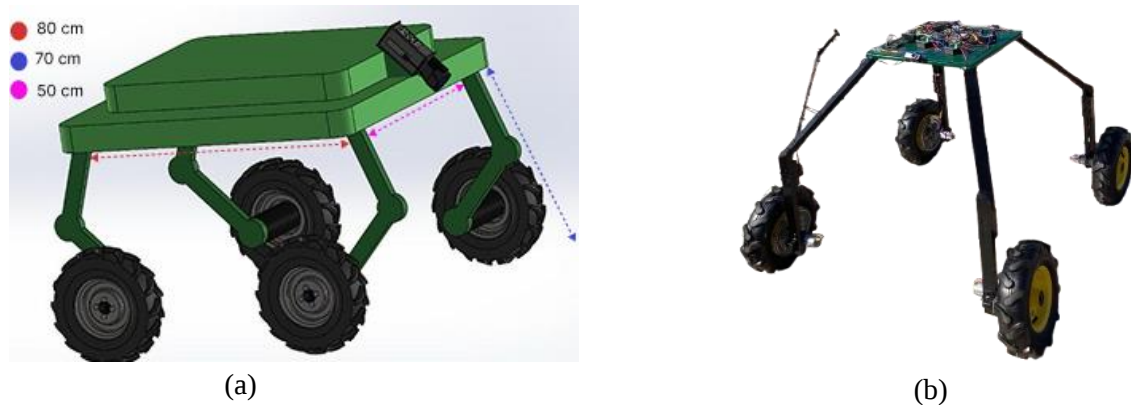


Figure 3. 3D model of the agricultural rover platform with overall dimensions

Mission software architecture and sensor visualization interface

The mission control software developed for the autonomous agricultural ground rover provides a comprehensive graphical user interface (GUI) that integrates navigation control, mission management, sensor visualization and operator interaction within a single environment. The software runs on a OC and communicates with the flight controller (FC) operating under the CP over a UART connection. The overall structure of the mission software interface is illustrated in Figure 4.



Figure 4. Mission software architecture and real-time sensor visualization interface of the autonomous agricultural rover

The navigation and mission execution functions of the interface are centered around three primary movement commands. The “Move to Here” function enables the operator to select a destination point directly on the OpenStreetMap-based map interface allowing the rover to autonomously navigate to the chosen location. The “Move to Coordinate” command provides precise navigation by directing the rover to user defined geographic coordinates entered manually by the operator. The “Set Speed” function allows the operator to define the rover’s traversal speed, ensuring adaptability to different mission objectives, terrain conditions and soil interaction requirements.

In addition to point-to-point navigation, the interface includes several mission and control mode buttons that govern the operational state of the rover. The Auto mode initiates fully autonomous mission execution-based on predefined waypoints and mission parameters. The Manual mode allows direct operator control using a remote controller which is particularly useful for testing, calibration, and safety override scenarios. The RTL command instructs the rover to autonomously return to its initial starting position, providing a failsafe mechanism in case of mission interruption or low battery conditions. The “Arm-Disarm” button is used to activate or deactivate the rover’s propulsion and control systems placing the platform into a ready or safe shutdown state. The “Mission Start” button triggers the execution of the currently loaded mission plan.

The “Mission Planning” function opens a dedicated planning window in which the operator can design complex missions. Within this window, the operator specifies waypoints directly on the map assigns traversal speeds for individual path segments and defines mission logic parameters. Once configured, the mission plan is stored in memory and can be executed autonomously without further operator intervention [22].

The interface also provides real-time visualization of orientation and motion data through graphical representations of the onboard gyroscope and compass sensors. These visual indicators display the rover’s roll, pitch and yaw angles as well as its heading direction, enabling the operator to continuously assess vehicle attitude and orientation during operation.

Comprehensive telemetry data are displayed in real time to support situational awareness and system monitoring. Position-related telemetry includes GPS latitude, longitude and ground speed while system health parameters include battery voltage, current consumption and power module status. Communication status, mission state and sensor feedback such as soil moisture readings are also presented within the interface. In parallel a live video stream from the OC camera is transmitted via RTSP and processed using the ODM object detection algorithm, enabling visual perception and intelligent scene analysis during autonomous missions.

Electrical and control hardware

The ground vehicle’s electrical and control architecture is designed to enable precise navigation, robust mobility and smart sensing for field operations. It integrates a autopilot a OC, multiple sensors, motor controllers and communication modules. The FC serves as the primary controller for navigation and basic actuator management. It connects to peripheral devices over PWM, UART, I²C and CAN interfaces. An integrated GNSS module provides multiconstellation GNSS positioning and an onboard digital compass for accurate localization and heading [22]. The FC also controls the servo motor that drives the soil sampling manipulator arm as shown in Figure 5 which illustrates the interconnections between all electrical and control hardware components.

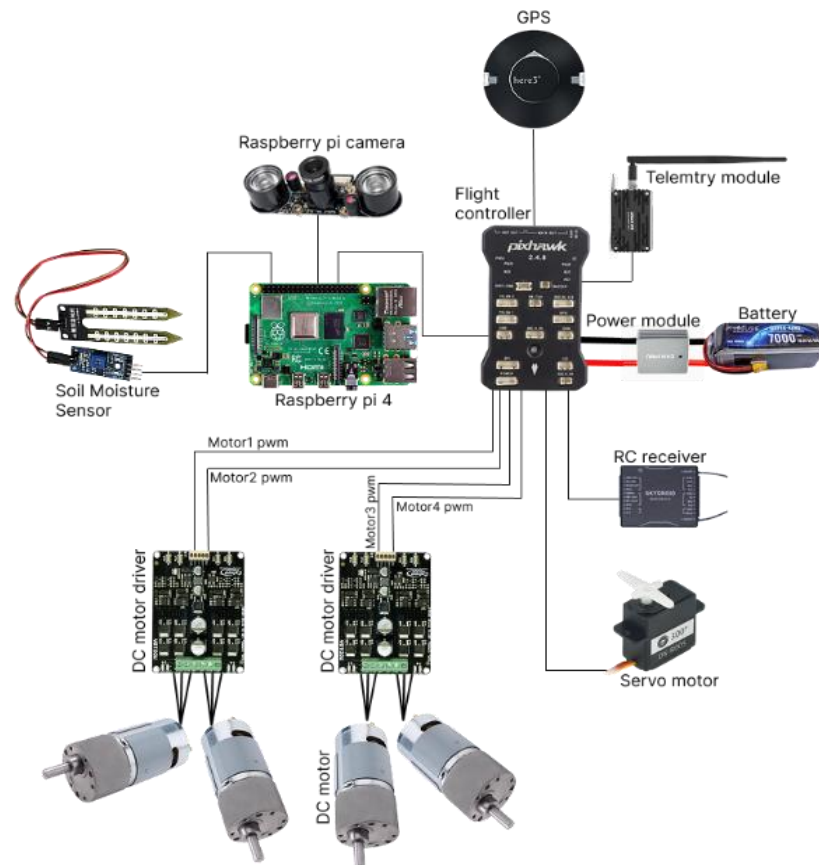


Figure 5. Electrical and control system architecture of the ground vehicle

It runs a Python-based interface implementing a ODM object detection algorithm on the video feed from an OC camera. Deploying ODM on the OC enables real-time computer vision directly on the vehicle, allowing detection of field features without external servers. The OC and FC communicate over a UART serial link using the CP the FC's telemetry port connects to the onboard computer's tx/rx pins so that the FC can send telemetry to the onboard computer and receive high level commands and data in return. This split ensures that compute intensive vision tasks do not overload the FC limited resources.

Communication with the operator is provided by two channels. Telemetry radio (operating in the 902-928 MHz band) links the rover to the GCS. The telemetry supports a high data rate and extremely long range, allowing bidirectional transmission of telemetry, commands and low-latency video metadata. In addition, a 2.4 GHz RC receiver and handheld transmitter provide a manual override control link. This receiver serves as a failsafe. An operator can take direct control of steering or stop the vehicle in case of emergency.

The vehicle's propulsion and actuation subsystem comprise four brushed wheel motors where each capable of 30 kg cm torque. These motors are arranged in two dual-motor driver units in that each driver controlling two motors, and each motor is driven through a 70 A electronic speed controller (ESC) from the FC via PWM signals. This drive configuration delivers strong traction for rough terrain. The servo for the soil probe arm is likewise driven by the FC's PWM output. Power is supplied by a 6S LiPo battery pack rated at 12000 mAh. A FC power management module is used inline with the battery, it regulates the voltage and reports current and voltage back to the FC so that

the software can monitor power usage. This ensures all subsystems receive a stable supply throughout typical field operation.

Finally, the onboard camera streams video over RTSP to the GCS for real-time monitoring. The visual feed, combined with the object detection output from ODM, lets the operator verify navigation and surveying results. Altogether, this hardware suite provides a scalable platform though the current prototype uses a single camera and probe the FC's ample I/O and the OC's compute headroom mean additional sensors or actuators can be integrated with software adjustments.

This agricultural robot system can be equipped with various sensors. Figure 6 illustrates the logical structure of the avionics system.

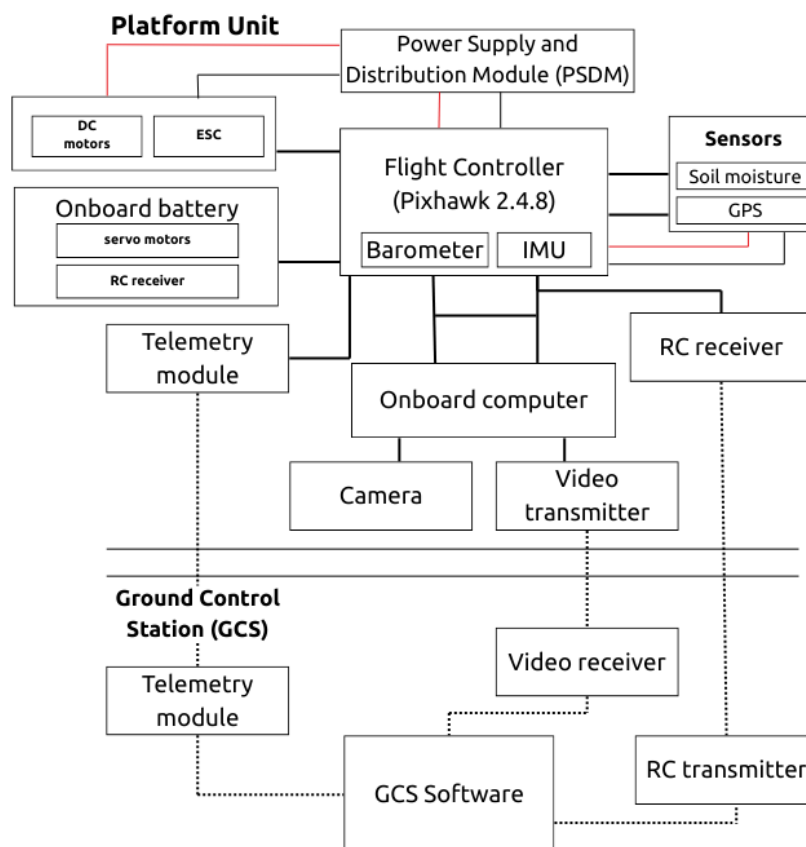


Figure 6. The logical structure of the avionics system

The key components of this architecture are summarized in Table 1 below.

Table 1

Electrical and control system architecture of the ground vehicle

Component	Model	Technical parameters	Function
FC	Pixhawk 2.4.8	IMU, PWM/UART/I2C	Central control unit
GPS module	Here 3+	GPS L1 C/A, GLONASS L10F	Positioning and directional heading
Telemetry module	CUAV P9	915 MHz, up to 30 km	Communication with GCS
Soil moisture sensor	Fc 28	Humidity, water	measures the moisture level

RC receiver	Skydroid H12	2.4 GHz, 12 channels	Manual control and testing
Power module	CUAV PMU	7-62 V input, 100 A, 5.2 V regulated output	Power regulation and monitoring
Motors	DC motors	30 kg cm torque	Propulsion
ESCs	70A ESCs	Throttle management	Motor speed control
Servo motors	Gear servos	10-15 kg cm torque, 1 unit	Sensor release mechanisms

Perception system

The perception subsystem is intended for acquiring and interpreting data on plant and soil conditions while the robot moves across the field. In the proposed system, it is implemented using a camera with neural network-based image analysis and contact-based soil moisture measurements. The outputs of this subsystem include detected disease symptoms with the predicted class, recognition confidence, and geographic coordinates, as well as a map of local moisture values transmitted to the operator in real time via the GCS.

Visual data are captured by an onboard camera mounted on the platform. The video stream used in two modes for online processing on the OC and for saving frames for subsequent offline analysis and model retraining. To improve robustness under field conditions, basic preprocessing applied before feeding frames into the model, including resizing to a fixed resolution, suppression of high frequency noise and brightness normalization. Conceptually, this processing pipeline follows the scheme shown in Figure 7.

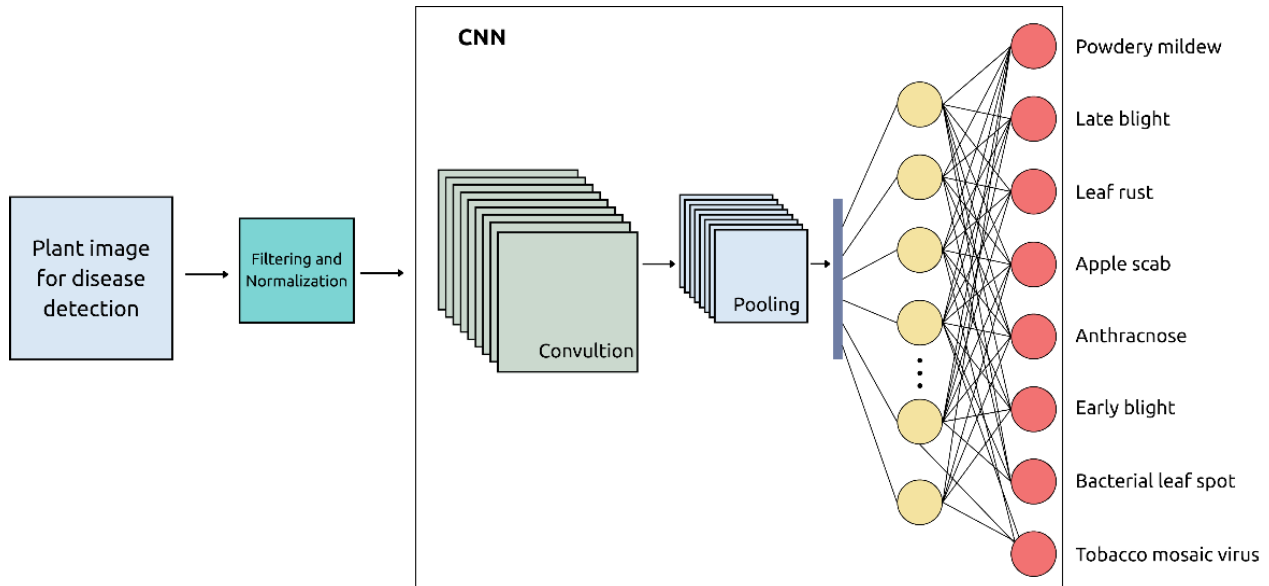


Figure 7. Image processing scheme in the perception subsystem: filtering, normalization, feature extraction and disease classification

ODM is used as the primary real-time recognition algorithm because it integrates localization and classification within a single forward pass and is well suited for deployment on embedded computing platforms. For each frame the model produces a set of detection hypotheses $\{(b_i, c_i, s_i)\}$ where b_i is the bounding box, c_i is the disease class, and $s_i \in [0,1]$ is the confidence score. To suppress weak and redundant predictions a confidence threshold and non-maximum suppression are applied.

The final detections are then visualized as overlays on the live video stream and simultaneously recorded in the observation log. The decision threshold can be expressed as:

$$d_i = \begin{cases} 1, & s_i \geq \tau, \\ 0, & s_i < \tau, \end{cases} \quad (1)$$

where τ is the selected confidence threshold.

To reduce the impact of illumination and contrast variations, normalization is applied during preprocessing. In this study, linear min-max normalization is used for each frame or channel:

$$I_{norm}(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min} + \varepsilon}, \quad (2)$$

where $I(x, y)$ is the original pixel intensity, I_{min} , I_{max} are the minimum and maximum values and ε is a small constant used to avoid division by zero.

A key feature of the perception subsystem is geo-referencing the detections. When a diseased plant is identified, the system saves the corresponding image, records the disease class and confidence score and appends GPS coordinates, timestamp and heading. As a result, a set of events is formed which can be used to generate disease hotspot maps and to support subsequent planning of agronomic interventions. On the GCS side, these events are presented as a notification stream and can be visualized on a map together with the robot's trajectory.

In addition to the visual channel, a soil moisture sensor is used to provide localized measurements at selected points along the route. The sensor value is acquired onboard, calibrated if necessary, and transmitted to the GCS as a telemetry parameter. Thus, the system simultaneously forms an image-based data layer describing plant health and a sensor-based data layer describing soil conditions, which makes it possible to identify low moisture zones and correlate them with visual stress indicators in plants. Integrating these two perception sources increases the practical value of the proposed solution for precision agriculture as the operator receives not only the detection result but also the environmental context at the same geographic location.

4. Experiment and results

4.1 Experimental setup and test design

To validate the proposed AI-based agricultural rover, a single end-to-end field trial was conducted under real operating conditions. The objective of the test was to assess continuous plant disease monitoring using the onboard perception pipeline and systematic soil moisture sampling with a fixed spatial resolution of 3 m.

The experimental platform consisted of a wheeled rover equipped with an OC camera and an analog soil moisture sensor integrated into the rover structure. FC running while bidirectional communication with the operator station was established via a telemetry link handling autonomous navigation and telemetry. During the trial, the custom GCS displayed the rover state, GPS coordinates, mission progress, live video stream with detection overlays and sensor telemetry. The trial conditions and mission are summarized in Table 2.

Table 2

Experimental conditions and mission parameters

Parameter	Value
Test area size	100 m × 100 m (10000 m ²)

Parameter	Value
Navigation pattern	Grid
Rover average speed	5 m/s
Mission duration	60 min
Total path length	20000 m
Soil moisture sampling interval	3 m
Weather	Sunny

The sensing and processing configuration of the system summarized in Table 3.

Table 3

Overview of the rover's sensing and processing configuration

Parameter	Value
Camera	CSI, 1080p, 30 fps
OC	Raspberry Pi 4B (4 GB RAM)
CP	MAVLink
ODM	YOLOv8 (real-time)
Logging	Time stamped, GPS events
Output visualization	GCS (video, map, telemetry)

4.2 Results and conclusions

The ODM perception module ran continuously during the mission, providing real-time detection overlays in the GCS. Detected disease candidates corresponded to visual symptoms and each instance assigned a model confidence score. During the trial, the vision subsystem achieved an estimated overall detection performance of 85-90%, which used as the primary performance indicator. Indicating stable operation during rover motion. To suppress low confidence and duplicate detections results were filtered using a predefined confidence threshold, then visualized in the live video stream and stored in the observation log.

The rover followed a grid-based trajectory while processing frames onboard with the ODM model. For each detection, the class label, confidence score, timestamp and GPS coordinates recorded. In parallel, soil moisture measurements were taken at 3 m intervals and stored in the same mission log. The synchronization workflow illustrated in Figure 8.

Integrated geo-referenced outputs. A central outcome of the experiment is that both perception streams were integrated into a unified geo-referenced mission log. Disease detections were stored as events containing the predicted class, confidence score, GPS coordinates, and timestamp while soil moisture samples provided a periodic soil profile with a 3 m spatial step.

Soil moisture values formed a spatially regular sequence along the route. Each measurement was time stamped and geo-tagged, enabling real-time display in the GCS and offline reconstruction of a moisture distribution map. Raw sensor readings were stored together with their positions, supporting identification of low moisture segments and comparison across surveyed zones. An example visualization of logged moisture points and rover trajectory provided in Figure 8. Trajectory and spatial distribution of logged soil moisture measurements.

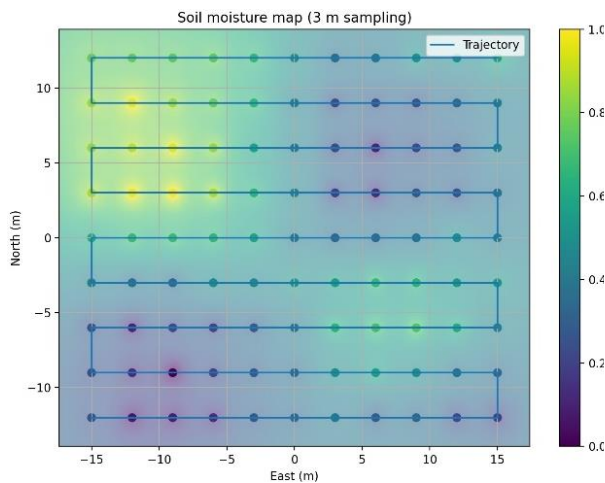


Figure 8. Trajectory and spatial distribution of logged soil moisture measurements

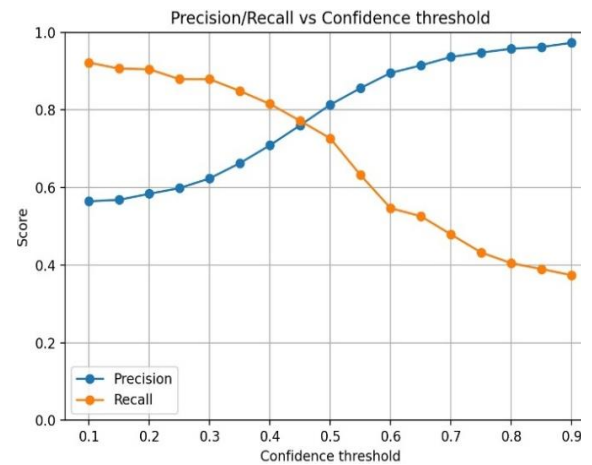


Figure 9. Mission workflow and sensor data synchronization

Overall, the single field trial confirms that the proposed rover system can perform continuous real-time ODM-based plant health monitoring while simultaneously collecting structured soil moisture measurements at fixed intervals with all outputs transmitted and visualized through the integrated GCS.

REFERENCES

1. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 2017, vol. 153, c. 69–80, DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.
2. Mohanty S.P., Hughes D.P., Salathé M. Using Deep Learning for Image-Based Plant Disease Detection. *Frontiers in Plant Science*, 2016, vol. 7, c. 1419, DOI: 10.3389/fpls.2016.01419.
3. McBratney A., Whelan B., Ancev T., Bouma J. Future Directions of Precision Agriculture. *Precision Agriculture*, 2005, vol. 6, № 1, c. 7–23, DOI: 10.1007/s11119-005-0681-8.
4. Fuentes A., Yoon S., Kim S., Park D. A Robust Deep-Learning-Based Detector for Real-Time Tomato Plant Diseases and Pests Recognition. *Sensors*, 2017, vol. 17, № 9, c. 2022, DOI: 10.3390/s17092022.
5. Hamrani A., Allouhi A., Bouarab F., Jayachandran K. AI and Robotics in Agriculture: A Systematic and Quantitative Review of Research Trends (2015–2025). *Crops*, 2025, vol. 5, № 5, c. 75, DOI: 10.3390/crops5050075.
6. Too E.C., Yujian L., Njuki S., Yingchun L. A comparative study of fine-tuning deep learning models for plant disease identification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, vol. 161, pp. 272–279, DOI: 10.1016/j.compag.2018.03.032.
7. Brahimi M., Boukhalfa K., Moussaoui A. Deep Learning for Tomato Diseases: Classification and Symptoms Visualization. *Applied Artificial Intelligence*, 2017, vol. 31, № 4, c. 299–315, DOI: 10.1080/08839514.2017.1315516.
8. Alhwaiti Y., Khan M., Asim M., Siddiqi M.H., Ishaq M., Alruwaili M. Leveraging YOLO deep learning models to enhance plant disease identification. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, № 1, c. 7969, DOI: 10.1038/s41598-025-92143-0.

9. Chen Z., Wu R., Lin Y., Li C., Chen S., Yuan Z., et al. Plant Disease Recognition Model Based on Improved YOLOv5. *Agronomy*, 2022, vol. 12, № 2, c. 365, DOI: 10.3390/agronomy12020365.
10. Wang H., Shang S., Wang D., He X., Feng K., Zhu H. Plant Disease Detection and Classification Method Based on the Optimized Lightweight YOLOv5 Model. *Agriculture*, 2022, vol. 12, № 7, c. 931, DOI: 10.3390/agriculture12070931.
11. Tong J., Zhang L., Tian J., Yu Q., Lang C. ToT-Net: A generalized and real-time crop disease detection framework via task-level meta-learning and lightweight multi-scale transformer. *Smart Agricultural Technology*, 2025, vol. 12, c. 101249, DOI: 10.1016/j.atech.2025.101249.
12. Fontani M., Luglio S.M., Gagliardi L., Peruzzi A., Frasconi C., Raffaelli M., et al. A Systematic Review of 59 Field Robots for Agricultural Tasks: Applications, Trends, and Future Directions. *Agronomy*, 2025, vol. 15, № 9, c. 2185, DOI: 10.3390/agronomy15092185.
13. Liu L., Yang F., Liu X., Du Y., Li X., Li G., et al. A review of the current status and common key technologies for agricultural field robots. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, vol. 227, pp. 109630, DOI: 10.1016/j.compag.2024.109630.
14. Guan X., Ge H., Nie S., Ding Y. Research on Agricultural Autonomous Positioning and Navigation System Based on LIO-SAM and Apriltag Fusion. *Agronomy*, 2025, vol. 15, № 12, c. 2731, DOI: 10.3390/agronomy15122731.
15. Chen Z., Yin J., Farhan S.M., Liu L., Zhang D., Zhou M., et al. A comprehensive review of obstacle avoidance for autonomous agricultural machinery in multi-operational environment. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2026, vol. 16, № 1, c. 139–163, DOI: 10.1016/j.aiia.2025.10.001.
16. Loconsole D., Elia M., Conversa G., De Lucia B., Cristiano G., Elia A. Soil Moisture Sensing Technologies: Principles, Applications, and Challenges in Agriculture. *Agronomy*, 2025, vol. 15, № 12, c. 2788, DOI: 10.3390/agronomy15122788.
17. Lloret J., Sendra S., Garcia L., Jimenez J.M. A Wireless Sensor Network Deployment for Soil Moisture Monitoring in Precision Agriculture. *Sensors*, 2021, vol. 21, № 21, c. 7243, DOI: 10.3390/s21217243.
18. Nguyen T.H., Yu H., Muller E., Askey S., Van Der Markt M., Sukkarieh S. A heterogeneous sensing system for soil moisture mapping in agricultural environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, vol. 239, c. 110932, DOI: 10.1016/j.compag.2025.110932.
19. Shalash O., Emad A., Fathy F., Alzogby A., Sallam M., Naser E., et al. Fusion of Robotics, AI, and Thermal Imaging Technologies for Intelligent Precision Agriculture Systems. *Sensors*, 2025, vol. 25, № 22, c. 6844, DOI: 10.3390/s25226844.
20. Ye F., Le F., Cui L., Han S., Gao J., Qu J., et al. Application of Navigation Path Planning and Trajectory Tracking Control Methods for Agricultural Robots. *Agriculture*, 2025, vol. 16, № 1, c. 64, DOI: 10.3390/agriculture16010064.
21. Nabiyeu R., Abdullayev A., Garayev G. STUDY OF FLIGHT-TECHNICAL PARAMETERS OF CONVERTOPLAN-TYPE UNMANNED MICRO AIRCRAFT IN MULTICOPTER MODE. , 2024, vol. 26, № 1, pp. 17–29, DOI: 10.30546/JNAA.2024.26.1.17.
22. Nabiyeu R., Abdullayev A., Garayev G. Study of the Designed Convertiplane-Type Micro UAV in Stationary and Multicopter Flight Modes with the On-Board Control-Measurement System. B: Karakoc T.H., Abdullayev K., Dalkiran A., Mirzayev F., Aghayev E., Cinoğlu B. (ред.). *Research and Updates on the Use of Artificial Intelligence in Drone Technology*, Springer Nature Switzerland, Cham, 2026, c. 64–70, DOI: 10.1007/978-3-032-07678-6_12.

BİTKİ XƏSTƏLİKLƏRİNİN AŞKARLANMASI VƏ TORPAQ NƏMLİYİ TƏHLİLİ ÜÇÜN SÜNİ İNTELLEKT ƏSASLI KƏND TƏSƏRRÜFATI ROBOTU

Qasımov V.Ə., Dadaşov F.H., Həsənov H.B., Hüseynov N.E.

Milli Aviasiya Akademiyası

Bu məqalədə genişmiqyaslı əkin sahələrində bitki sağlamlığının və torpaq rütubətinin real vaxt rejimində monitorinqi üçün avtonom kənd təsərrüfatı yerüstü robotu təqdim olunur. Təklif olunan sistem davamlı və coğrafi istinadlı sahə analizini təmin etmək üçün dərin öyrənməyə əsaslanan qavrama altsistemini, avtonom naviqasiyanı və xüsusi yerüstü idarəetmə stansiyasını (YİS) integrasiya edir. Vizual məlumatlar bort kamerası vasitəsilə əldə olunur və Raspberry Pi üzərində obyekt aşkarlama modeli (OAM) istifadə edilməklə real vaxt rejimində emal edilərək rəng dəyişməsi, deformasiya və yarpaq degradasiyası kimi xəstəliklə əlaqəli vizual simptomlar müəyyən olunur. Aşkar edilmiş hər bir obyekt etibarlılıq göstəricisi ilə əlaqələndirilir və GPS məlumatlarından istifadə edilməklə dəqiq şəkildə coğrafi etikətlənir.

Paralel olaraq, kontakt əsaslı torpaq rütubəti sensoru şəbəkə əsaslı örtmə trayektoriyası boyunca sabit məkan intervalllarında lokal ölçmələr aparır. Bütün qavrama nəticələri naviqasiya məlumatları ilə sinxronlaşdırılır və telemetriya bağlantısı vasitəsilə GCS-ə ötürülür; burada aşkarlama nişanları ilə canlı video, rover trayektoriyası, missiya statusu və sensor telemetriyası vizuallaşdırılır və missiyadan sonrakı analiz üçün qeydiyyatla alınır.

Real iş şəraitində aparılmış sahə təcrübələri stabil avtonom işləməni nümayiş etdirmiş və ümumi bitki xəstəliyi aşkarlama dəqiqliyinin 85–90% təşkil etdiyini göstərmişdir. Bu nəticə təklif olunan sistemin dəqiq kənd təsərrüfatı tətbiqləri üçün effektivliyini təsdiqləyir.

Açar sözlər: *kənd təsərrüfatı, mobil robot sistemi, YOLO alqoritmi, təsvir təhlili, torpaq nəmliyinin sensoru, muxtar sahə monitorinqi.*

Information about the authors

Name, surname, fathers name	Workplace	Position, scientific degree, scientific name	Contact
Gasimov Vagif Alijavad	Baku Engineering University	Faculty of Information and Computer Technologies, Dean, Doctor of Technical Sciences, professor	vaqasimov@beu.edu.az mob: (+994) 70 213-99-98
Dadashov Fuad Hasan	National Aviation Academy	Artificial Intelligence Technologies Department, Head of Department, Ph.D.	fdadashov@naa.edu.az mob: (+994) 55 868-51-62
Hasanov Huseyn Bakhtiyar	National Aviation Academy	Aircraft Development Laboratory, Lead Avionics Engineer	huseyn.hasanov@naa.edu.az mob: (+994) 50 787-54-25
Huseynov Namig Elshad	National Aviation Academy	Aircraft Development Laboratory, Lead Avionics Engineer	namig.huseynov@naa.edu.az mob: (+994) 51 875-03-18

UDC: 665.6:66.067

DOI: 10.30546/EMNAA.2026.02.28.145

IONIC LIQUID PURIFICATION OF PETROLEUM DISTILLATES

Nasirov F.A.

*Academician Y.H. Mammadaliyev Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of
Science and Education of the Republic of Azerbaijan*

The solvents, traditionally employed in the industrially applied methods for the selective purification of oil fractions (furfural, N-methyl pyrrolidone - NMP, morpholine, sulfolane, etc.) are volatile, toxic, has corrosive nature and relatively low selectivity. These limitations highlight the urgent need for new approaches to the purification of petroleum distillates to ensure the production of high-quality fuels and oils while minimizing environmental impact.

The use of ionic-liquid compounds as selective solvents for the extraction purification of petroleum distillates has garnered significant scientific and practical interest. Owing to their unique combination of properties—including negligible volatility, low vapor pressure, high chemical and thermal stability, strong solvating ability across various compound classes, and superior selectivity—ionic liquids have emerged as promising “green solvents.” They now play an increasingly important role in the development of environmentally sustainable synthesis and refining processes.

The objective of this study is to produce high-quality oils and fuels for diverse applications by employing ionic liquids synthesized from formic and acetic acids as selective solvents. Through systematic experimentation, optimal conditions for the extraction-based purification of different types of petroleum feedstocks—such as diesel distillates, transformer oil, medicinal Naftalan oil, lubricating distillates, and kerosene—have been identified. The study demonstrates the effectiveness and potential of ionic-liquid extraction as an environmentally friendly and economically viable method for the deep purification of petroleum fractions.

Keywords: *petroleum distillates, diesel fuel, kerosene, gasoline, lubricating distillates, Naftalan oil, extraction, raffinate, ionic liquid, green solvents, selective purification, dearomatization.*

In recent decades, the rapid growth of the global energy sector and the continuous increase in fuel consumption have intensified the demand for cleaner and more efficient petroleum products. Simultaneously, environmental regulations introduced in many countries have imposed stricter limits on sulfur compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons, and resinous substances contained in fuels and lubricants. These trends have stimulated the search for innovative purification technologies capable of ensuring both high product quality and reduced environmental impact. Among the most promising approaches, extraction purification using ionic liquids has attracted considerable attention due to its combination of technological efficiency, ecological safety, and economic feasibility.

At present, environmental protection remains a critical global concern. One of the strategies to address this issue is the development of environmentally friendly and economically efficient

technologies in the petrochemical and oil refining industries. In light of this, there is an increasing need to improve the quality of fuels and oils for various applications.

Conventional industrial methods, particularly the hydrotreating of petroleum distillates to remove undesirable carcinogenic components, require the use of costly catalysts, large volumes of hydrogen, and operation under high temperatures and pressures. Moreover, adsorption purification methods are only effective for treating low-sulfur fractions of diesel distillates [1,2]. In addition, hydrotreating technologies are associated with high energy consumption and significant operational costs related to catalyst regeneration and hydrogen production. The increasing complexity of crude oil composition, especially the higher content of sulfur- and aromatic-containing compounds in heavy crude oils, further complicates the operation of conventional refining units. Consequently, alternative purification approaches capable of operating under milder conditions have become highly desirable.

Among the industrially applied methods for the selective purification of oil fractions, extraction-based purification techniques are distinguished by their ability to operate under mild temperature and pressure conditions. These methods typically use extractants such as furfural, N-methylpyrrolidone (NMP), morpholine, sulfolane, and others. However, the solvents traditionally employed in these processes are often limited by their volatility, toxicity, corrosive nature, and relatively low selectivity. Furthermore, many conventional solvents exhibit partial losses during operation due to evaporation, thereby increasing process costs and causing environmental concerns. These limitations highlight the urgent need for new approaches to the purification of petroleum distillates to ensure the production of high-quality fuels and oils while minimizing environmental impact.

In this context, the use of ionic-liquid compounds as selective solvents for the extraction purification of petroleum distillates has garnered significant scientific and practical interest [3,4]. Owing to their unique combination of properties—including negligible volatility, low vapor pressure, high chemical and thermal stability, strong solvating ability across various compound classes, and superior selectivity—ionic liquids have emerged as promising “green solvents.” They now play an increasingly important role in the development of environmentally sustainable synthesis and refining processes [5–16]. Another important advantage of ionic liquids is the possibility of tailoring their physicochemical properties through variation of cationic and anionic structures. This tunability enables the design of ionic liquids with optimized extraction selectivity toward sulfur-containing, nitrogen-containing, or aromatic compounds present in petroleum fractions. In addition, their nonflammable nature contributes to improved operational safety compared with traditional organic solvents.

At the Institute of Petrochemical Processes named after acad. Yu.H. Mamedaliyev, systematic studies have been carried out to produce high-quality diesel fuel, kerosene, gasoline, and base oils via extraction purification using ionic-liquid compounds synthesized from formic and acetic acids as selective solvents [17–23]. The performed investigations included laboratory-scale extraction experiments, physicochemical characterization of raffinates and extracts, spectroscopic analyses, and molecular modeling studies aimed at understanding intermolecular interactions between ionic liquids and petroleum components.

Diesel fuel holds a prominent position among motor fuels, primarily due to the steady expansion of vehicle fleets. However, increasing diesel fuel consumption is accompanied by more stringent regulatory requirements concerning the permissible levels of aromatic and sulfur-containing hydrocarbons, as well as resinous compounds. Sulfur compounds contained in diesel

fuels contribute significantly to atmospheric pollution through sulfur oxide emissions, while aromatic hydrocarbons adversely affect combustion quality and increase the formation of soot and carcinogenic particulate matter. Therefore, the reduction of sulfur and aromatic contents is essential not only for compliance with international standards but also for improving engine performance and reducing harmful emissions.

As a result of the conducted research, optimal conditions were developed for obtaining diesel fuel that complies with European standards through ionic-liquid extraction purification of diesel distillates of various compositions. In particular, the purification process was applied to hydrotreated diesel distillate (HDD) and straight-run diesel distillate (SRD) produced at the Baku Oil Refinery named after H. Aliyev, as well as to narrow fractions derived from SRD and mixtures of SRD with secondary processing products, including catalytic cracking light gas oil and coking products, in mass ratios of 70:30% or 70:15:15%, respectively.

The HDD feedstock, characterized by a boiling point range of 185–364°C, contained 16 wt % of aromatic hydrocarbons and 311 ppm of sulfur compounds. A systematic series of experiments confirmed that both the yield and quality indicators of the purified diesel fuel depend on the composition of the ionic-liquid extractant and the extraction conditions [24,25]. Parameters such as extraction temperature, phase contact time, extractant-to-feed ratio, and the number of extraction stages were found to strongly influence the efficiency of dearomatization and desulfurization. Lower temperatures generally promoted higher selectivity, while multi-stage extraction enabled deeper removal of undesirable compounds.

Under the optimized conditions, nearly complete dearomatization of the feedstock was achieved. The degrees of desulfurization reached 58.2 wt % and 63.57 wt %, respectively. After ionic-liquid purification, the resulting diesel fuel exhibited a clear appearance, indicating the effective removal of resinous compounds from the distillate. Improved color and transparency of the raffinate additionally confirmed the extraction of heavy condensed aromatic structures responsible for instability during storage.

It was demonstrated that diesel fuel purified by selective ionic-liquid extraction using N-methylpyrrolidonium acetate complies with Euro-5 standards in terms of cetane number (52) and density (831 kg/m³ at 20°C), while also significantly exceeding Euro-3 limits for residual sulfur content (130 ppm versus the allowed 350 ppm). The increase in cetane number after purification can be explained by the reduction of aromatic hydrocarbons and the enrichment of paraffinic and naphthenic components in the raffinate phase.

Based on these findings, the authors carried out the extraction purification of SRD with a boiling point range of 191–350°C, containing 12 wt% aromatic hydrocarbons and 983 ppm sulfur compounds, as well as isolated fractions with aromatic contents ranging from 8 to 16 wt % and sulfur contents from 596 to 1533 ppm. The extraction process was conducted at temperatures between 20–25°C in both single-stage and multi-stage modes, using different ratios of ionic-liquid extractant to raw material [26,27].

A series of experiments revealed that multi-stage ionic-liquid extraction of SRD under identical conditions led to the production of distillates with enhanced characteristics. In particular, during two-stage purification, the raffinate obtained with a yield of 84.08 wt % contained 4 wt % residual aromatic hydrocarbons and 470 ppm sulfur compounds, corresponding to degrees of dearomatization and desulfurization of 66.67 wt % and 52.19 wt %, respectively.

Under the same purification conditions, for the diesel fraction with a boiling point above 300°C, the degrees of dearomatization and desulfurization were 59.7 wt % and 75.4 wt %, respectively.

respectively. The raffinate obtained in this case exhibited a residual aromatic content of 4 wt % and 379 ppm sulfur content, with a yield of 80 wt %. These results demonstrate that ionic liquids are especially effective in treating heavier fractions enriched with polycyclic aromatic and sulfur-containing compounds.

The authors also investigated the feasibility of producing high-quality diesel fuel through ionic-liquid extraction purification of a mixture of straight-run diesel distillate (SDD) with secondary oil refining products - specifically, light coking gas oil (LCG) and catalytic cracking gas oil (LCCG). These compositions were obtained by blending SDD with 30 wt % of secondary refining components [28,29]. The incorporation of secondary processing products into diesel fuel production is economically attractive because it expands the raw material base and increases refinery profitability. However, such fractions usually contain elevated concentrations of sulfur compounds, olefins, and aromatic hydrocarbons, which complicates their direct utilization.

The process was carried out in both single-stage and multi-stage modes, with an assessment of the effects of extractant quantity and contact time between phases. It was found that stage-wise extraction purification of these SDD-based mixtures using morpholinium formate, N-methylpyrrolidonium acetate (NMPA), or dibutylammonium acetate as selective solvents resulted in high levels of purification. In particular, when treating blends with high aromatic hydrocarbon contents (25-29 wt %) and sulfur compound concentrations ranging from 1629 to 1768 ppm using NMPA, the degrees of dearomatization and desulfurization reached 76.0-87.5 wt % and 64.4-67.04 wt %, respectively. The findings also revealed that under constant extraction conditions, an increase in the initial aromatic content led to a corresponding increase in removal efficiency. This phenomenon can be attributed to stronger intermolecular interactions between aromatic molecules and ionic-liquid structures.

These results were supported by IR and UV spectroscopic analyses of both the untreated distillates and their corresponding raffinate products. Spectroscopic investigations confirmed a substantial reduction in absorption bands characteristic of aromatic rings and sulfur-containing functional groups after purification. Comparative GC-MS analysis of the hydrocarbon group composition of blended diesel fuel (SDD + LCG), purified using NMPA and the industrial extractant N-methylpyrrolidone (NMP), showed that the aromatic content in the raffinate obtained with NMPA (3.57 wt %) was 1.6 times lower than that in the raffinate treated with NMP (5.69 wt %), thereby underscoring the effectiveness of ionic-liquid extraction.

To expand the feedstock base for diesel fuel production, the authors [30] optimized the conditions for ionic-liquid extraction purification of a ternary blend comprising SDD, LCG, and LCCG in a 70:15:15 wt % ratio. When using NMPA and morpholinium formate (MF) as extractants, the resulting raffinates, obtained with nearly identical yields (71.2 wt %), exhibited dearomatization degrees of 86.2 wt % and 82.76 wt % and desulfurization degrees of 64.33 wt % and 61.05 wt %, respectively.

Using NMPA as a selective solvent, the authors also studied the extraction purification of a model diesel fuel consisting of hexane (aliphatic component), thiophene (sulfur compound), and m-xylene (aromatic compound). Molecular dynamics simulations conducted using the AKMD software demonstrated the efficacy of the ionic-liquid system, with a substantial reduction in aromatic content and thiophene removal efficiency reaching up to 80 wt % [31]. Computational modeling additionally revealed the formation of stable intermolecular complexes between the ionic liquid and aromatic sulfur-containing molecules, explaining the high selectivity observed experimentally.

Furthermore, the potential of ionic liquids - specifically morpholinium formate and anilinium formate - as extractants for the desulfurization of catalytic cracking gasoline and coking gasoline was evaluated [32,33]. A detailed investigation into the effects of various parameters revealed that the efficiency of sulfur removal depended on the nature of the sulfur-containing compounds, the ionic-liquid-to-feedstock ratio, and the extraction duration. Notably, under a 1:1 mass ratio of morpholinium formate to catalytic cracking gasoline and a contact time of 30 minutes, a desulfurization efficiency of 70.0 wt % was achieved. The obtained gasoline fractions also exhibited improved oxidation stability and reduced gum formation tendencies.

In view of increasingly stringent environmental regulations, the implementation of greener solvents in the production of high-quality base oils has become a critical challenge for the refining industry.

Within the framework of research aimed at developing environmentally safe purification methods aligned with the principles of green chemistry, the authors [34,35] established the optimal conditions for selective purification of AMG-10 distillate. This distillate was obtained by compounding 10-degree oil fractions from the Neft Dashlary oil field. The purification process involved multi-stage ionic-liquid extraction at 60°C, with a contact time of 1 hour per stage, using fresh portions of diethylammonium formate (DEAF) at each stage. Under these conditions, the dearomatization degree of the feedstock reached 85.7 wt %. Moreover, complete dearomatization was achieved when a threefold excess of NMPA was applied relative to the raw material. The resulting base oil for AMG-10 hydraulic fluid met the specifications outlined in TU-0253-021-46693103-2006 in terms of its physicochemical properties.

During the ongoing research cycle on ionic-liquid extraction purification, optimal conditions were developed for the selective treatment of oil fractions with varying viscosities (3.85, 7.5, 8.5, and 18.0 mm²/s at 100°C), as well as for their blended compositions, using ionic liquids synthesized from formic and acetic acids as selective solvents [36]. The resulting base oils obtained through ionic-liquid purification were characterized by improved physicochemical performance, notably high thermal stability (sediment concentration ranging from 0.21 to 0.96 wt %), low total sulfur content (0.1077–0.1412 wt %), and low mercaptan sulfur levels (0.01 wt %). In addition, the refined oils displayed enhanced viscosity indices and improved resistance to oxidative degradation during long-term operation.

In the extraction purification of transformer oil with a boiling range of 250–405°C, ionic liquids of various compositions - namely morpholinium formate, anilinium formate, and N-methylpyrrolidonium acetate - were employed as selective solvents. The study identified optimal processing conditions for obtaining the target product with high yields (81.2–85.0 wt %) and enhanced quality indicators. The obtained raffinate samples demonstrated favorable dielectric loss tangent values of 0.31 and 0.41 [37].

Analysis of the structure-group composition of the raffinates purified via ionic-liquid extraction revealed that, regardless of the solvent composition, the naphthene-paraffin hydrocarbon content ranged from 90.0 to 93.8 wt%, while aromatic hydrocarbons accounted for 6.2–10.0 wt %. The refined transformer oil was found to meet the specifications of GOST 982-80. Moreover, the effectiveness of ionic-liquid extraction was confirmed by both the higher raffinate yield (compared to acid-contact purification, which yielded 76.7 wt %) and the superior removal of aromatic hydrocarbons and resinous components.

Studies on the ionic-liquid extraction purification of kerosene fractions with different boiling ranges (136–240°C, 145–250°C, and 185–250°C) and aromatic hydrocarbon contents (12.0, 16.5,

and 17.0 wt %, respectively) using acetic acid-based ionic liquids confirmed the superiority of the extraction process over traditional acid-contact methods. UV spectral analysis of raffinate samples purified with NMPA indicated a significant reduction in residual aromatic content, further validating the efficiency of the ionic-liquid approach. Importantly, the use of ionic liquids in kerosene purification eliminates environmental concerns associated with acid-contact methods, including the formation of non-recyclable acid tar and contaminated wastewater [38-40].

The study also demonstrated the feasibility of near-complete dearomatization of Naftalan oil, a petroleum fraction widely used in medical applications. To optimize the purification process, the effects of temperature, solvent-to-feed ratio, and contact time were investigated. It was found that, under controlled conditions, the residual aromatic content could be reduced to 0.5-0.6 wt % (as measured by the sulfonation method) when using NMPA and DEAF as extractants for Naftalan oil with a boiling range of 200-450°C [41]. The purification of Naftalan oil is particularly important because aromatic compounds may negatively influence the therapeutic and toxicological properties of the final medicinal product.

In conclusion, the research confirms the high efficiency and industrial potential of ionic-liquid extraction purification for a wide range of petroleum fractions. Ionic liquids synthesized from formic and acetic acids provide deep dearomatization and desulfurization, while allowing for solvent regeneration and reuse without loss of selectivity. This makes the technology both economically advantageous and environmentally sound. As such, ionic-liquid extraction represents an effective alternative to conventional techniques such as acid-contact purification and hydrotreating and can be recommended for the industrial production of high-quality fuels and lubricating oils. Furthermore, the adaptability of ionic-liquid systems, combined with their low environmental impact and high extraction efficiency, creates favorable prospects for scaling up these technologies and integrating them into modern refining schemes focused on sustainable industrial development.

ƏDƏBİYYAT

1. Mguni L.L., Yao Y., Liu X., Yuan Z., Hildebrandt D. Ultra-deep desulphurization of both model and commercial diesel fuels by adsorption method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. -2019. -Vol. 7. -Iss.2. -Article 102957.
2. Tuktin B., Zhandarov E., Nurgaliyev N., Tenizbayeva A., Shapovalov A. Hydrotreating of gasoline and diesel oil fractions over modified alumina/zeolite catalysts. *Petroleum Science and Technology*. - 2019. -Vol. 37. -Iss. 15. P. 1770-1776.
3. Mahdiah S., Babak M., Hamid R. Oxidative Desulfurization of Diesel Fuel Using a Brønsted Acidic Ionic Liquid Supported on Silica Gel. *Energy & Fuels*. - 2017. - 31(9). - P. 10196–10205.
4. Mohumed H., Rahman S., Imtiaz S.A. Oxidative-extractive desulfurization of model fuels using a pyridinium ionic liquid. *ACS Omega*, – 2020. -Vol. 5. -İss. 14. – P. 8023–8031.
5. Nasirov F.A., Novruzova F.M., Aslanbeyli A.M., Azizov A.H. Ionic liquids in catalytic processes of transformation of olefins and dienes (Review). *Petroleum chemistry*. -2007. - Vol.47. - No.5, - P.309-317.
6. Nasirov F.A., Novruzova F.M., Aslanbeyli A.M., Azizov A.H., Janibeyov N.F. Ionic Liquids as reaction media in propene dimerization with nickel containing catalytic dithiosystems. *Georgia Chemical Journal*. -2007. -Vol. 7. - No.3. -P. 281-287.

7. Насиров Ф.А., Новрузова Ф.М., Асланбейли А.М., Азизов А.Г. Двухфазный процесс димеризации бутенов в ионных жидкостях с использованием никельсодержащих каталитических дитиосистем. Процессы нефтехимии и нефтепереработки. - 2007. -№ 4 (31). - С.72-80.
8. Насиров Ф.А., Асланбейли А.М. Новрузова Ф.М., Азизов А.Г., Джанибеков Н.Ф. Совместная димеризация и олигомеризация олефинов фракции C₃-C₄ в ионных жидкостях с использованием никель- и кобальтсодержащих каталитических дитиосистем. Процессы нефтехимии и нефтепереработки. -2008. -№ 3-4. -С.305-316.
9. Насиров Ф.А., Новрузова Ф.М., Асланбейли А.М. Джафаров Р.П., Азизов А.Г., Джанибеков Н.Ф. Математическая обработка результатов эксперимента и нахождение оптимальных условий процессов димеризации пропилена и бутиленов в ионных жидкостях с использованием никельсодержащих каталитических дитиосистем. Проблемы химии. -2008. - № 3. -С.497-502.
10. Abdullayev Y., Mammadov A., Karimova N., Talybov A., Yolchuyeva U., Autschbach J. Construction of New Azo-group Containing Polycyclic Imidazole Derivatives: Computational Mechanistic, Structural, and Fluorescence Studies. Chemistry Select. - 2020. - 5. -P. 6224–6229.
11. Khamiyev M.J., Azizov A.H., Khanmetov A.A., Alieva R.V., Mammadov A.M. Synthesis and investigation of zirconium complexes with "grafted" ionic-liquid type containing amino- and iminohydrochloride ligands. Azerbaijan Chemical Journal. -2016. No. 1. -P. 54-59.
12. Ibrahimova M.J., Abdullayeva F.M., Pashayeva Z.N., Ibrahimova T.A., Baghirova B.F. Synthesis and study of ionic liquid quaternary ammonium salt. Processes of Petrochemistry and Oil Refining, Special issue. - 2024. - No. 1. -P. 114-122.
13. Ibrahimova M.J., Amirli F.A., Bayramova S.T., Kuliyevev A.D., Ibrahimova T.A., Abdullayeva F. M., Pashayeva Z.N. Synthesis and investigation of composites based on phenol-formaldehyde resin, Processes of Petrochemistry and Oil Refining, Special issue. - 2024. -No. 1. - P.165-174.
14. Ibragimova M.D., Pashayeva Z.N., Abdullayeva F.M. Possibilities for using ionic liquids in the polymerization process. International Petroleum&Petrochemical Technology Conference (IPPTC 2024). Journal of Physics Conference Series. -2024. 2834 012185.
15. Ibragimova M.D., Amirov F.A., Bairamova S.T., Ibragimova T.A., Abdullaeva F.M., Pashaeva Z.N. Modification of Phenol–Formaldehyde Resin with Alkyl Aromatic Hydrocarbons. Polymer Science, Series D. 2024. Vol. 17. P. 646–651.
16. İbrahimova M.D., Abdullayeva F.M., Paşayeva Z.N., İbrahimova T.A. Synthesis of ionic liquid monomer N,N-diethyl–N-(2-methacryloxyethyl)ammonium chloride and polymers(copolymers based on it). Processes of Petrochemistry and Oil Refining(PROR), - 2020. -Vol.21. -№2. -P.231-241.
17. Seidova S. A., Ibrahimova M. D., Abbasov V. M., Huseynov H. J., Yolchuyeva U. J., Akhmedbekova S. F. Ionic liquid extraction as an effective alternative in the process of dearomatization of petroleum oils. SOCAR Proceedings. - 2024. - No.3. -P. 107-112.
18. Ibragimova M.J., Seidova S.A., Alieva S.G., Huseynov H.J., Abdullaeva Kh.A., Yusifzade F.Yu. Ionic liquids as extragents of compounds negatively affecting the environmental properties of diesel fuel. Azerbaijan Chemical Journal. - 2024. - № 3. - P.20-28.
19. Ibragimova M.D., Seidova S.A., Aliyeva S.G., Dzhaferova R.A., Yolchueva U.J. Research of the residual content of aromatic hydrocarbons in the composition of diesel fuel after extraction

- cleaning, SOCAR Proceedings. - 2022.-No. 3. -P.101-105.
20. Seyidova S.A. Justification of high efficiency of ionic liquid in the process of extraction cleaning of diesel fraction. Processes of Petrochemistry and Oil-Refining. -2019.-No. 3. -P. 291-296.
 21. Seidova S.A., Ibrahimova M.J., Ismailova A.E. Binary mixture of ionic liquids in purification of transformer oil. PPOR. -2025. -Vol. 26. - No. 2. -P. 392-398.
 22. Сеидова С.А. Экстракционные методы очистки моторного топлива. Химия и химическая технология. - 2019. -№10. -С.30-39.
 23. Abbasov V.M., Gaile A.A., Ibrahimova M.J., Seidova S.A., Muradov A.N. Extraction: A promising method for selective purification of petroleum fractions. PPOR. -2025. - Vol. 26. - No. 3. -P. 697-708.
 24. Ibrahimova M.J., Seidova S.A., Babayev M.A. Extractive purification of diesel distillate with a mixed solvent based on ionic liquids. PPOR. - 2025. -Vol. 26. - No.1. -P. 208-216
 25. Ibragimova M.D., Aliyeva S.G., Seyidova S.A., Guseinov G.J., Abbasov V.M., Nagiyev V.A. Improvement of quality of the hydropurified diesel fuel by ion-liquid extraction. International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS). -2018. - 4 (5). -P. 91-94.
 26. Ибрагимова М.Д., С.А.Сеидова, С.Г.Алиева. Ионно-жидкостная экстракционная очистка дизельных фракций с различным содержанием ароматических и сернистых соединений. Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. - 2019. -№4, -С.26-32.
 27. Ibrahimova M.J., Seyidova S.A., Aliyeva S.G. Extraction ennoblement of diesel fuel and the close- cut fractions on its basis. Azerbaijan Chemical Journal. -2018. - No. 4. -P. 60-68.
 28. Ибрагимова М.Д., Сеидова С.А., Гусейнов Г.Дж., Аббасов В.М., Нагиев В.А., Алиева С.А., Джафарова Р.А., Ахмедбекова С.Ф. Исследование структурно-группового состава рафината и экстракта, полученных деароматизацией смеси прямогонной дизельной фракции с продуктами вторичной переработки нефти. Нефтепереработка и нефтехимия. -2018. -№ 8, -С.14-20.
 29. Ibrahimova M.J., Abbasov V.M., Aliyeva S.G., Khalilov A.B., Guseinov G.Dzh., Nagiyev V.A., Alizada A.E., Seidova S.A. Group hydrocarbon composition of the mixture of straight-run diesel fraction with light gas oil coking before and after purification of ionic liquid extraction. Processes of Petrochemistry and Oil-Refining. -2019. - No., – P. 433-439.
 30. Ibrahimova M.D., Seidova S.A., Gusejnov G.Dzh., Aliyeva S.G., Dzhaifarova R.A. Extractive purification of diesel distillate using selective «green» solvents. Processes of petrochemistry and oil refining. - 2022. -Vol.23. - No 4. – P. 621-627.
 31. Mammadhasanov K.K., Seyidova S.A., Ibrahimova M.D., Abbasov V.M., Huseynov H.J., Komolkin A.V. Simulation of ionic-liquid extractive purification process of thiophene and m-xylene from their mixture with n-hexane by the molecular dynamics method. Modern Physics Letters B. - 2023. -37. - 30. -Article ID 2350139.
 32. Ибрагимова М.Д., Азизов А.Г., Гусейнова А.Д. Исследование процесса селективной очистки бензина риформинга морфолинформиатной ионной жидкостью. Процессы нефтехимии и нефтепереработки.– 2011. -Т. 12. - № 3(47). – С.189-194.
 33. Мирзоева Л.М., Ибрагимова М.Д., Нагиев В.А., Юнусов С.Г., Андрющенко Н.К., Гусейнов Г.Д. Применение ионных жидкостей для обессеривания бензиновых фракций, Химия и технология топлив и масел. -2018. -№ 4(608). -P. 28-32.
 34. Аббасов В.М., Ибрагимова М.Д., Алиева С.Г., Халилов А.Б., Нагиев В.А., Ахмедбекова С.Ф. Исследование возможности получения основы гидравлического масла АМГ-10

- ионно- жидкостной очисткой дистиллята с месторождения «Нефт дашлары». Технология нефти и газа, – 2017. №6, – с. 27-33.
35. Ibragimova M.D., Abbasov V.A., Khalilov A.B., Aliyeva S.Q., Huseinov H.J., Nagiyev V.A., Alizadeh A.E., Seidova S.A. Selective purification of the oil fractions with use of ionic liquid as extractant on the basis of N-methylpyrrolidone. Processes of petrochemistry and oil refining. – 2018. -Vol. 19. - №3. -P. 302-313.
36. Ibragimova M. D., Huseynov H. J., Hasanova R.Z. Diethylamine and formic acid-based ionic liquid in selective purification process of oil distillates of various viscosities. Modern Physics Letters B, World Scientific Publishing: – 2022. -Vol. 35. -№12. Article ID 2150505.
37. Ибрагимова М.Д., Нагиев В.А., Гусейнов Г.Дж., Халилов А.Б., Гасанова Р.З., Абдуллаева Х.А. Ионная жидкость N-метилпирролидионий ацетат в качестве экстрагента в процессах избирательной очистки дистиллята трансформаторного масла. Нефтепереработка и Нефтехимия. -2019. -№ 5, -С.45-48.
38. Ibrahimova M.J., Mamedova T.A., Aliyeva S.Q., Huseinov H.J., Seyidova S.A., Naghiyev V.A., Dzhaferova R.A. Research into kerosene fraction dearomatization process by means of ionic liquid extraction. Chemical problems, – 2019. -№ 4 (17). – P. 576-583.
39. Huseynov H.J. Study dearomatization of kerosene by IR and UV spectral analysis. Modern Physics Letters B, World Scientific Publishing: -2021. -Vol. 35. -№12. -P. Article ID 2150197.
40. Ибрагимова М.Д., Гусейнов Г.Дж., Сеидова С.А., Йолчуева У.Д., Ахмедбеков С.Ф., Юсифзаде Ф.Ю. Ионно-жидкостная деароматизация керосиновой фракции N-метилпирролидионий формиатом. Башкирский химический журнал, -2023. -Т .30, - с.36-40.
41. Ибрагимова М.Д., Аббасов В.М., Сеидова С.А., Гусейнов Г.Дж., Ахмедбекова С.Ф., Йолчуева У.Дж. Ионно-жидкостная экстракционная очистка Нафталанской нефти. Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация.-2021. -№ 2, -С. 5-13.

REFERENCES

1. Mguni L.L., Yao Y., Liu X. , Yuan Z., Hildebrandt D. Ultra-deep desulphurization of both model and commercial diesel fuels by adsorption method. Journal of Environmental Chemical Engineering. -2019. -Vol. 7. -Iss.2. -Article 102957.
2. Tukhtin B., Zhandarov E., Nurgaliyev N., Tenizbayeva A., Shapovalov A. Hydrotreating of gasoline and diesel oil fractions over modified alumina/zeolite catalysts. Petroleum Science and Technology. - 2019. -Vol. 37. -Iss. 15. P. 1770-1776.
3. Mahdiah S., Babak M., Hamid R. Oxidative Desulfurization of Diesel Fuel Using a Brønsted Acidic Ionic Liquid Supported on Silica Gel. Energy & Fuels. - 2017. - 31(9). - P. 10196–10205.
4. Mohamed H., Rahman S., Imtiaz S.A. Oxidative-extractive desulfurization of model fuels using a pyridinium ionic liquid. ACS Omega, – 2020. -Vol. 5. -Iss. 14. – P. 8023–8031.
5. Nasirov F.A., Novruzova F.M., Aslanbeyli A.M., Azizov A.H. Ionic liquids in catalytic processes of transformation of olefins and dienes (Review). Petroleum chemistry. -2007. - Vol.47. - No.5, - P.309-317.

6. Nasirov F.A., Novruzova F.M., Aslanbeyli A.M., Azizov A.H., Janibeyov N.F. Ionic Liquids as reaction media in propene dimerization with nickel containing catalytic dithiosystems. Georgia Chemical Journal. -2007. -Vol. 7. - No.3. -P. 281-287.
7. Nasirov F.A., Novruzova F.M., Aslanbeyli A.M., Azizov A.H. Dvukhfazniy protsess dimerizatsii butenov v ionnikh zhidkostyakh s ispolzovaniem nikelsoderzhashikh kataliticheskikh ditnosistem. Protsessi neftekhimii i neftepererabotki. - 2007. -№ 4 (31). - s.72-80.
8. Nasirov F.A., Aslanbeyli A.M., Novruzova F.M., Azizov A.H., Janibekov N.F. Sovmestnaya dimerizatsiya i oliqomerizatsiya olefinov fraktsii C₃-C₄ v ionnikh zhidkostyakh s ispolzovaniem nikel i kobaltsoderzhashikh kataliticheskikh ditiosistem. Protsessi neftekhimii i neftepererabotki. -2008. -№ 3-4. -s.305-316.
9. Nasirov F.A., Novruzova F.M., Aslanbeyli A.M., Dzhaferov R.P., Azizov A.H., Janibeyov N.F. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov ehksperimenta i nakhozhdenie optimal'nykh usloviy protsessov dimerizatsii propilena i butilenov v ionnykh zhidkostyakh s ispol'zovaniem nikel'soderzhashchikh ditiosistem. Problemy khimii. -2008. - № 3. -s.497-502.
10. Abdullayev Y., Mammadov A., Karimova N., Talybov A., Yolchuyeva U., Autschbach J. Construction of New Azo-group Containing Polycyclic Imidazole Derivatives: Computational Mechanistic, Structural, and Fluorescence Studies. Chemistry Select. - 2020. - 5. -P. 6224–6229.
11. Khamiyev M.J., Azizov A.H., Khanmetov A.A., Alieva R.V., Mammadov A.M. Synthesis and investigation of zirconium complexes with "grafted" ionic-liquid type containing amino- and iminohydrochloride ligands. Azerbaijan Chemical Journal. -2016. No. 1. -P. 54-59.
12. Ibrahimova M.J., Abdullayeva F.M., Pashayeva Z.N., Ibrahimova T.A., Baghirova B.F. Synthesis and study of ionic liquid quaternary ammonium salt. Processes of Petrochemistry and Oil Refining, Special issue. - 2024. - No. 1. -P. 114-122.
13. Ibrahimova M.J., Amirli F.A., Bayramova S.T., Kuliyeu A.D., Ibrahimova T.A., Abdullayeva F. M., Pashayeva Z.N. Synthesis and investigation of composites based on phenol-formaldehyde resin, Processes of Petrochemistry and Oil Refining, Special issue. - 2024. -No. 1. - P.165-174.
14. Ibragimova M.D., Pashaeva Z.N., Abdullayeva F.M. Possibilities for using ionic liquids in the polymerization process. International Petroleum&Petrochemical Technology Conference (IPPTC 2024). Journal of Physics Conference Series. -2024. 2834 012185.
15. Ibragimova M.D., Amirov F.A., Bairamova S.T., Ibragimova T.A., Abdullaeva F.M., Pashayeva Z.N. Modification of Phenol–Formaldehyde Resin with Alkyl Aromatic Hydrocarbons. Polymer Science, Series D. 2024. Vol. 17. P. 646–651.
16. İbrahimova M.D., Abdullayeva F.M., Paşayeva Z.N., İbrahimova T.A. Synthesis of ionic liquid monomer N,N-diethyl–N-(2-methacryloxyethyl)ammonium chloride and polymers (copolymers based on it). Processes of Petrochemistry and Oil Refining (PROR), -2020. - Vol.21. -№2. -P.231-241.
17. Seidova S. A., Ibrahimova M. D., Abbasov V. M., Huseynov H. J., Yolchuyeva U. J., Akhmedbekova S. F. Ionic liquid extraction as an effective alternative in the process of dearomatization of petroleum oils. SOCAR Proceedings. - 2024. - No.3. -P. 107-112.

18. Ibragimova M.J., Seidova S.A., Alieva S.G., Huseynov H.J., Abdullaeva Kh.A., Yusifzade F.Yu. Ionic liquids as extragents of compounds negatively affecting the environmental properties of diesel fuel. *Azerbaijan Chemical Journal*. - 2024. - № 3. - P.20-28.
19. Ibragimova M.D., Seidova S.A., Aliyeva S.G., Dzhafarova R.A., Yolchueva U.J. Research of the residual content of aromatic hydrocarbons in the composition of diesel fuel after extraction cleaning, *SOCAR Proceedings*. - 2022.-No. 3. -P.101-105.
20. Seyidova S.A. Justification of high efficiency of ionic liquid in the process of extraction cleaning of diesel fraction. *Processes of Petrochemistry and Oil-Refining*. -2019.-No. 3. -P. 291-296.
21. Seyidova S.A., Ibrahimova M.J., Ismailova A.E. Binary mixture of ionic liquids in purification of transformer oil. *PPOR*. -2025. -Vol. 26. - No. 2. -P. 392-398.
22. Seidova S.A. Ekstraktsionnye metody ochistki motornogo topliva. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. - 2019. -№10. -s.30-39.
23. Abbasov V.M., Gaile A.A., Ibrahimova M.J., Seidova S.A., Muradov A.N. Extraction: A promising method for selective purification of petroleum fractions. *PPOR*. -2025. - Vol. 26. -No. 3. -P. 697-708.
24. Ibrahimova M.J., Seidova S.A., Babayev M.A. Extractive purification of diesel distillate with a mixed solvent based on ionic liquids. *PPOR*. - 2025. -Vol. 26. - No.1. -P. 208-216
25. Ibragimova M.D., Aliyeva S.G., Seyidova S.A., Guseynov G.J., Abbasov V.M., Nagiyev V.A. Improvement of quality of the hydropurified diesel fuel by ion-liquid extraction. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*. -2018. - 4 (5). -P. 91-94.
26. Ibragimova M.D., S.A.Seidova, S.G. Alieva Ionno-zhidkostnaya ekstraktsionnaya ochistka dizelnikh fraktsiy s razlichnim soderzhaniem aromaticheskikh i sernistikh soedineniy. *Vestnik VGU. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*.- 2019. -№4, -C.26-32.
27. Ibrahimova M.D., Seyidova S.A., Aliyeva S.G. Extraction ennoblement of diesel fuel and the close- cut fractions on its basis. *Azerbaijan Chemical Journal*. -2018. - No. 4. -P. 60-68.
28. Ibragimova M.D., Seidova S.A., Guseynov G.Dzh., Abbasov V.M., Nagiyev V.A., Aliyeva S.A., Dzhafarova R.A., Akhmedbekova S.F. Issledovanie strukturno-gruppovogo sostava rafinata i ekstrakta, poluchennikh dearomatizatsiey smesi pryamogonnoy dizelnoy fraktsii s produktami vtorichnoy pererabotki nefti. *Neftepererabotka i neftekhimiya*. -2018. -№ 8, - s.14-20.
29. Ibrahimova M.D., Abbasov V.M., Aliyeva S.G., Khalilov A.B., Guseynov G.Dzh., Nagiyev V.A., Alizada A.E., Seidova S.A. Group hydrocarbon composition of the mixture of straight-run diesel fraction with light gas oil coking before and after purification of ionic liquid extraction. *Processes of Petrochemistry and Oil-Refining*. -2019. - No., – P. 433-439.
30. Ibrahimova M.D., Seidova S.A., Guseynov G.Dzh., Aliyeva S.G., Dzhafarova R.A. Extractive purification of diesel distillate using selective «green» solvents. *Processes of petrochemistry and oil refining*. - 2022. -Vol.23. - No 4. – P. 621-627.
31. Mammadhasanov K.K., Seyidova S.A., Ibrahimova M.D., Abbasov V.M., Huseynov H.J., Komolkin A.V. Simulation of ionic-liquid extractive purification process of thiophene and m-xylene from their mixture with n-hexane by the molecular dynamics method. *Modern Physics Letters B*. - 2023. -37. - 30. -Article ID 2350139.
32. Ibragimova M.D., Azizov A.G., Guseynova A.D. Issledovanie protsessa selektivnoy ochistki

- benzina riforminga morfolinformiatnoy ionnoy zhidkostyu. Protsessi neftekhimii i neftepererabotki.– 2011. -T. 12. - № 3(47). – C.189-194.
33. Mirzoeva L.M., Ibragimova M.D., Nagiev V.A., Yunusov S.G., Andryushenko N.K., Guseynov G.D. Primenenie ionnykh zhidkostey dlya obesserivaniya benzinovikh fraktsiy. Khimiya i tekhnologiya topliv i masel. -2018. -№ 4(608). -P. 28-32.
34. Abbasov V.M., Ibragimova M.D., Alieva S.G., Khalilova A.B., Nagiev V.A., Akhmedbekova S.F. Issledovanie vozmozhnosti polucheniya osnovi gidravlicheskogo masla AMG-10 ionno-zhidkostnoy ochistkoy distillyata s mestorozhdeniya «Neft dashlari». Tekhnologiya nefti i gaza, – 2017. №6, – s. 27-33.
35. Ibragimova M.D., Abbasov V.A., Khalilov A.B., Aliyeva S.G., Huseinov H.J., Nagiyev V.A., Alizadeh A.E., Seidova S.A. Selective purification of the oil fractions with use of ionic liquid as extractant on the basis of N-methylpyrrolidone. Processes of petrochemistry and oil refining. – 2018. -Vol. 19. - №3. -P. 302-313.
36. Ibragimova M. D., Huseynov H. J., Hasanova R.Z. Diethylamine and formic acid-based ionic liquid in selective purification process of oil distillates of various viscosities. Modern Physics Letters B, World Scientific Publishing: – 2022. -Vol. 35. -№12. Article ID 2150505.
37. Ibragimova M. D., Nagiev V.A., Guseynov G.Dzh., Khalilov A.B., Gasanova R.Z., Abdullaeva Kh.A. Ionnoy zhidkost N-metilpirrolidonium atsetat v kachestve ekstragenta v protsessakh izbiratelnoy ochistki distillyata transformatornogo masla. Neftepererabotka i Neftekhimiya. -2019. -№ 5, - S.45-48.
38. Ibrahimova M.D., Mamedova T.A., Aliyeva S.Q., Huseinov H.J., Seyidova S.A., Naghiyev V.A., Dzhafarova R.A. Research into kerosene fraction dearomatization process by means of ionic liquid extraction. Chemical problems,– 2019. -№ 4 (17). – P. 576-583.
39. Huseynov H.J. Study dearomatization of kerosene by IR and UV spectral analysis. Modern Physics Letters B, World Scientific Publishing: – 2021. -Vol. 35. - №12. – P. Article ID 2150197.
40. Ibrahimova M.D., Guseynov G.Dzh., Seidova S.A., Yolchueva U.D., Akhmedbekov S.F., Yusifzade F.Yu. Ionno-zhidkostnaya dearomatizatsiya kerosinovoy fraktsii N-metilpirrolidonium formiatom. Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal, -2023. -T. 30, – s.36-40.
41. Ibrahimova M.D., Abbasov V.M., Seidova S.A., Guseynov G.Dzh., Akhmedbekova S.F., Yolchueva U.Dzh. Ionno-zhidkostnaya ekstraktsionnaya ochistka Naftalanskoy nefti. Vestnik VGU. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya.– 2021. -№ 2, -s. 5-13.

NEFT DİSTİLLATLARININ İON MAYE İLƏ TƏMİZLƏNMƏSİ

Nəsirov F.Ə.

***Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi akademik Y. H. Məmmədəliyev adına
Neft-Kimyə Prosesləri İnstitutu***

Neft fraksiyalarının seçici təmizlənməsi üçün sənayedə ənənəvi olaraq istifadə olunan həlledicilər (furfurol, N-metilpirrolidon -NMP, morfolin, sulfolan və s.) uçuucu, toksik və korroziyaedici xüsusiyyətə malik olub, nisbətən aşağı selektivlik göstərir. Yüksək keyfiyyətli yanacaq və yağların istehsalını təmin etməklə yanaşı, ətraf mühitə təsiri minimuma endirən neft distillatlarının təmizlənməsi üçün yeni yanaşmalara ehtiyac var.

İon mayelərinin neft distillatlarının ekstraksiya yolu ilə təmizlənməsi üçün seçici həlledicilər kimi istifadəsi böyük elmi və praktiki maraq doğurur. Çox aşağı uçuculuq, zəif buxar təzyiqi, yüksək kimyəvi və istilik sabitliyi, müxtəlif sinif birləşmələri həll etmə qabiliyyəti və yüksək selektivlik kimi unikal xüsusiyyətlərinə görə ion mayeləri perspektivli “yaşıl həlledicilər” hesab olunur. Onlar ekoloji cəhətdən dayanıqlı sintez və neft emalı proseslərinin inkişafında getdikcə daha mühüm rol oynayır.

Bu tədqiqat işinin məqsədi qarışqa və sirkə turşuları əsasında sintez edilmiş ion mayələrindən seçici həlledici kimi istifadə etməklə müxtəlif sahələrdə tətbiq oluna bilən yüksək keyfiyyətli yağ və yanacaqlar almaqdır. Aparılmış sistemli eksperimentlər nəticəsində dizel distillatları, transformator yağı, müalicəvi Naftalan yağı, sürtkü distillatları və kerosin kimi müxtəlif neft xammallarının ekstraksiya yolu ilə təmizlənməsi üçün optimal şərait müəyyən edilmişdir. Tədqiqat ion mayeləri ilə ekstraksiyanın neft fraksiyalarının dərin təmizlənməsi üçün ekoloji cəhətdən təhlükəsiz və iqtisadi baxımdan səmərəli bir metod olduğunu nümayiş etdirir.

Açar sözlər: neft distillatları, dizel yanacağı, kerosin, benzin, sürtkü distillatları, Naftalan yağı, ekstraksiya, rafinat, ion mayesi, yaşıl həlledicilər, selektiv təmizlənmə, dearomatizasiya.

Information about the author

Name, surname, fathers name	Workplace	Position, scientific degree, scientific name	Contact
Nasirov Fuzuli Akbar	Academician Y.H. Mammadaliyev Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan	Head of the laboratory of “Polyfunctional complexones and metal complex compounds”, DSc(Chem), Ass. prof.	fizuli_nasirov@yahoo.com mob: (+994) 50 356-78-11

SİNTEZ EDİLMİŞ YENİ ARİLSULFONİLPIPERİDİN TÖRƏMƏLƏRİNİN *in vitro* BİOLOJİ SİNAĞI VƏ *MurA* FERMENTİNƏ QARŞI İNHİBİTOR POTENSİALININ *in silico* TƏDQIQI

¹Məmmədova S.İ., ²Zeynalova L.F., ²Məmmədova G.H., ¹Əskərova K.T.,

¹Ağazadə A.Ə., ¹Ladoxina N.P.

¹Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi "Kimya İnstitutu" PHŞ

²Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti

Tədqiqatın məqsədi yeni piperidinsulfamid törəmələrinin sintezi, onların struktur-fəallıq asılılığının (SAR) müəyyən edilməsi, həmçinin in vitro və in silico üsullarla antimikrob fəallıqlarını müqayisəli tədqiq edərək yüksək inhibitor potensiallı yeni molekul strukturlarının müəyyən edilməsidir.

Bu məqsədlə, Xloramin-B-nin allilxloridlə qarşılıqlı təsirindən alınan yüksək reaksiya qabiliyyətli sintonun ditiokarbamat və ksantogenat duzları ilə nukleofil əvəzlənməsi, ardınca isə benzasetonla heterotsiklləşməsi vasitəsilə yeni piperidinsulfamid törəmələri sintez edilmişdir. In vitro sınaqlar zamanı birləşmələrin qrammüsbət (S. aureus, B. subtilis) və qrammənfi (P. vulgaris, E. coli) bakteriyalara, həmçinin patogen göbələklərə (A. fumigatus, C. albicans) qarşı fərqli bioloji fəallığı aşkar edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, piperidin nüvəsinə farmakofor xassəli ksantogenat və ditiokarbamat fraqmentlərinin daxil edilməsi antimikrob təsir spektrini əhəmiyyətli dərəcədə genişləndirir.

Molekulyar dokinq analizi (PDB ID:1A2N) sintez olunmuş liqandların bakterial hüceyrə divarının biosintezində həlledici rol oynayan MurA fermentinin aktiv mərkəzində -6.4 ÷ -6.8 kcal/mol diapazonunda əlverişli bağlanma enerjisi ilə stabil adduktlar yaratdığını göstərmişdir. Xüsusilə, butilksantogenat törəməsi olan 2-metil-4-fenil-1-(fenilsulfonil)-5- butilksantogenat-5-(butilksantogenat-metil) piperidin (1e) ARG120, GLY164, VAL163 və ASP305 amin turşuları ilə stabil hidrogen rabitələri və π-anion qarşılıqlı təsirləri yaradaraq hər iki sınaq metodunda ən yüksək nəticəni nümayiş etdirmişdir. Quruluş-fəallıq asılılığı (SAR) analizi təsdiq edir ki, alifatik yan zəncirin uzunluğunun artması hidrofob "ciblərdə" daha sıx bağlanmanı təmin edərək inhibitor potensialını yüksəldir. Alınan nəticələr bu növ sulfamid birləşmələrin yeni nəsil antimikrob vasitələrin hazırlanmasında perspektivli sinton olduğunu sübut edir.

Açar sözlər: arilsulfamidlər, piperidin törəmələri, ksantogenatlar, ditiokarbamatlar, molekulyar dokinq, *MurA* inhibitorları, antimikrob fəallıq

Müasir farmakologiyada sulfamidlər təkcə klassik antibakterial agentlər kimi deyil, həm də viral infeksiyalar (SARS-CoV-2 daxil olmaqla), iltihabi proseslər və bədxassəli şişlərlə mübarizədə yüksək terapevtik potensiala malik çoxfunksiyalı birləşmələr kimi qəbul edilir [1-5].

Sulfoturşuların xloramidləri təkcə dezinfeksiyaedici və oksidləşdirici maddələr kimi deyil, həm də son zamanlar əlçatanlığı və qeyri-toksikliyi sayəsində müxtəlif kimyəvi xüsusiyyətləri ilə əlaqəli müxtəlif reaksiyalarda geniş tətbiq tapırlar [6]. Sulfofillərin N-halogenamidlərin olefinlərə birləşməsi ilk dəfə Foldi tərəfindən həyata keçirilmişdir [7]. Birləşmə məhsulunun alınması N-brommetilsulfamidlərin fenilbutilenlə reaksiyası sayəsində mümkün olmuşdur. Son illərdə sülfofillərin N, N-dihalogenaminlərinin olefinlərə birləşmə reaksiyalarında müxtəlif katalizator və promotorlardan istifadə olunur. Belə ki, karbon dioksidin promotor qismində iştirakı ilə olefinlərin aminoxlorlaşdırılmasının yeni sintez metodu təsvir edilmişdir [8].

Xloraminlərin diqqətəlayiq xüsusiyyətlərindən biri onların yüksək reaksiya çevikliyidir ki, bu da mühit şəraitindən asılı olaraq reaksiyanın istiqamətini dəyişməyə imkan verir. Məsələn, xloramin-B-nin iştirakı ilə arenkarbaldehid oksimlərin propargil-N-fenilkarbonatla regiosektiv reaksiyası baş verir ki, bu da təkcə birləşməyə deyil, həm də oksazolidinlərin əmələ gəlməsi ilə nəticələnən tsiklləşməyə gətirib çıxarır [9]. Bundan əlavə, həlledicinin dəyişdirilməsi (su və ya efir) reaksiyanı müvafiq olaraq β -xlorgidrinlərin və ya β -xlorefirinlərin əmələ gəlməsinə yönəldə bilər. Bu β -funksionallaşdırılmış birləşmələrdəki xlor atomu yüksək reaksiya qabiliyyətini qoruyub saxlayır ki, bu da növbəti çevrilmələr üçün imkanlar açır [10]. Tədqiqatlar, həmçinin göstərmişdir ki, sulfosillərin N-monoxloraminləri su, spirtlər və ya üzvi turşuların iştirakı ilə olefinlərlə qarşılıqlı təsirdə olaraq 1-xlor-2-hidroksi-, -alkoksi- və ya -karboksialkillər əmələ gətirir; bu zaman alkil radikalının uzunluğu reaksiyanın gedişinə əhəmiyyətli təsir göstərmir [11]. Olefinlərin xlorlaşdırılmasının yeni metodu işlənib hazırlanmışdır [12]. Elektron-akseptor sulfamid fraqmentinin təsiri altında N-2,3 vəziyyətindəki halogenlər nukleofillərlə asanlıqla əvəz olunur. N-2,2-dixloretil qrupları saxlayan sulfamidlər fenildiaminlə xinoksalin əmələ gətirir [13], sulfonilaziridindəki halogen isə hətta β -vəziyyətində belə asanlıqla əvəz olunaraq benzotiazepinin əmələ gəlməsinə səbəb olur [14]. Bizim tədqiqatlarımız [15-17] göstərmişdir ki, doymamış birləşmələrin xloramidləşdirilməsi üçün ən əlverişli reagentlər benzolsulfosillərin N-monoxloramidləridir (xloramin-B, -T, -XB və s.). Müəyyən edilmişdir ki, xloramin-B-nin akril turşusunun butil efiri (butilakrilat) ilə reaksiyası həlledicinin təbiətindən və temperatur rejimindən əhəmiyyətli dərəcədə asılıdır [18].

Tədqiqat işində müxtəlif molekulyar sistemlərin Xloramin-B vasitəsilə sulfamid qrupu ilə funksionallaşdırılmasına həsr olunmuşdur. Xloramin-B molekulunun həm elektrofil xlor, həm də nukleofil azot mənbəyi olması, onu sulfonil tərkibli birləşmələrin sintezində universal reagentə çevirir. Onun əsas xüsusiyyəti N-Cl rabitəsinin olmasıdır. Bu rabitə reaksiya şərtlərindən asılı olaraq ya polyarlaşır ($N\delta^+ - Cl\delta^-$ və ya $N\delta^- - Cl\delta^+$ kimi), ya da radikallar əmələ gətirərək homolitik parçalanmaya məruz qalır.

Xloramin-B-nin alkenlərlə reaksiyası Markovnikov qaydasına zidd olaraq, radikal mexanizmi üzrə gedir və N- β -xlor-sulfamidlərin sintezinə səbəb olur. Bu birləşmələr əvvəllər cüt rabitəni əmələ gətirən müxtəlif karbon atomlarına birləşmiş sulfamid qrupu ($-SO_2NH-$) və xlor atomunu ehtiva edir.

Əvvəlki illərdə apardığımız tədqiqatlar [19,20] zamanı xloramin-B-nin (I) allilxloridlə 35%-li xlorid turşusunun iştirakı ilə aprotik həlledicidə qarşılıqlı təsiri nəticəsində 1-fenilsulfonilamido-2,3-dixloropropan (II) sintez edilmişdir. Müvafiq sintonun etil spirtində, qələvi katalizatorun iştirakı ilə ditiokarbamat və ksantogenat tipli 1,1-ditio-birləşmələrlə 1:2 mol nisbətində nukleofil əvəzetmə reaksiyaları həyata keçirilmiş və nəticədə N- (2,3-əvəzli propil) benzolsulfamid törəmələri sintez edilmişdir. Birləşmə (III) isə öz növbəsində benzalasetonla qarşılıqlı təsirdə olaraq heterosiklləşməyə məruz qalır və 1a-e birləşmələrini əmələ gətirir (şəkil 1).

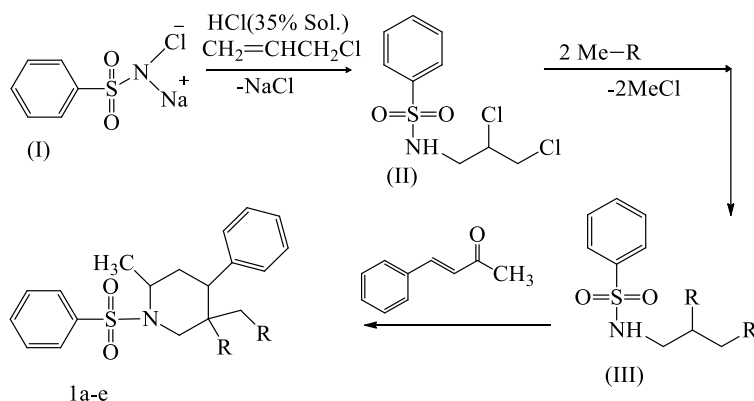
Təcrübi hissə

Sintez edilmiş sulfamidlərin İQ-spektrləri «Nicolet 1s-10» spektrometrində, NMR¹H-spektrləri isə işçi tezliyi 500 mHz olan «Bruker Avance III» spektrometrində qeydə alınmışdır.

1-fenilsulfonilamido-N-2,3-dixloropropan (II)

0.25 mol (28 q) allilxlorid, 0.3 mol (80.5 q) xloramin-B və 100 ml benzol qarışığı 25–30 dərəcə ilkin qarışdırıldıqdan sonra, üzərinə 35 ml qatı (35.5%) HCl məhlulu temperatur 40–45°C -dən yuxarı qalxmıyacaq sürətlə damcı-damcı əlavə edilmişdir. Qarışıq daha sonra 50°C temperaturda 3 saat müddətində qarışdırılmış, soyudulmuş və üzərinə 50 ml heksan əlavə edilmişdir. Çökən kristallar süzülmüş, heksanla yuyulmuş və qurudulmuşdur. Daha sonra onlar etanoldan təkrar kristallaşdırılmışdır.

Birləşmə (II): Çıxım 46.8 q (69.8%), ərimə temperaturu 193–195°C. Tapılıb, %: N 5.68, S 12.16, C₁₉H₃₁N₃O₂S₅ üçün hesablanıb, %: N 5.24, S 11.95.



- 1a: Me=Na; R= -S₂CN(CH₃)₂.
1b: Me=Na; R= -S₂CN(C₂H₅)₂.
1c: Me=K; R= -S₂COC₂H₅
1d: Me=K; R= -S₂COC₃H₇
1e: Me=K; R= -S₂COC₄H₉

Şəkil 1. 1a–e birləşmələrinin əmələgəlmə sxemi

1-fenilsulfamido-N-2, 3-di-(R)-propan (III)

Ümumi metodika: 0.03 mol (7.9 q) birləşmə (I) və 0.062 mol N, N-dimetil(-etil-) ditiokarbamat natrium (və ya 0.062 mol O-etil(-izopropil-; -izobutil-) ditiokarbonat kalium) 50 ml etanolda həll edilmişdir. Qarışıq 9 saat müddətində qaynadılmışdır. Daha sonra etanol distillə edilmiş və reaksiya kütləsinə 50 ml su əlavə edilmişdir. Çökən kristallar süzülüb, qurudulmuş və etanoldan təkrar kristallaşdırılmışdır.

2-metil-4-fenil-1-(fenilsulfonil)-5-R-5-(R-metil)piperidin (1a–e)

Ümumi metodika: 0.003 mol birləşmə (III) və 0.003 mol benzalasetonun 30 ml mütləq etanolda olan məhluluna 0.003 mol NaOH əlavə edilmişdir. Reaksiya qarışığı 5–6 saat müddətində əks soyuducu altında qaynadılmış, daha sonra soyudulmuşdur. Çökən kristallar süzülüb və etanoldan təkrar kristallaşdırılmışdır. Alınmış birləşmələrin fiziki-kimyəvi xassələri cədvəl 1-də verilmişdir.

2-metil-4-fenil-1-(fenilsulfonil)-5- dietilditiokarbamat -5-(dietilditiokarbamat -metil) piperidin (1a)

¹H NMR (500 MHz, DMSO-d₆, δ, ppm): 1.12 (d, 3H, CH₃), 1.64-1.89 (m, 2H, CH₂), 2.92 (m, 1H, CH-N), 3.05 (s, 12H, N(CH₃)₂), 3.05 (m, 1H, CH-Ph), 3.35-3.59 (m, 4H, 2CH₂-S), 3.43-3.67 (m, 2H, CH₂-N), 7.28-7.39 (m, 5H, Ph), 7.63-7.87 (m, 5H, SO₂Ph).

2-metil-4-fenil-1-(fenilsulfonil)-5- butilksantogenat -5-(butilksantogenat -metil) piperidin (1e)

¹H NMR (500 MHz, DMSO-d₆, δ, ppm): 0.92 (t, 6H, CH₃), 1.14 (d, 3H, CH₃ piperidine), 1.45-1.54 (m, 8H, 4CH₂ butyl), 1.64-1.88 (m, 2H, CH₂ ring), 2.92 (m, 1H, CH-N), 3.05 (m, 1H, CH-Ph), 3.35-3.6 (m, 4H, 2CH₂-S), 3.43-3.68 (m, 2H, CH₂-N), 4.62 (t, 4H, 2CH₂-O), 7.28-7.39 (m, 5H, Ph), 7.66-7.89 (m, 5H, SO₂Ph).

Cədvəl 1

Sintez edilmiş birləşmələrin fiziki-kimyəvi xassələri

Birl. işarələri	Çıxım,%	Ərimə temperaturu Tər, °C	Brutto formulu	Element analizi, Tapılıb, Hesablanıb, %	
				N	S
1	2	3	4	5	6
1a	54.60	302-305	C ₂₅ H ₃₃ N ₃ O ₂ S ₅	<u>7.35</u> 7.40	<u>27.20</u> 28.21
1b	60.40	296-300	C ₂₉ H ₄₁ N ₃ O ₂ S ₅	<u>6.75</u> 6.73	<u>25.70</u> 25.68
1c	56.30	282-283	C ₂₅ H ₃₁ O ₄ N ₂ S	<u>2.43</u> 2.46	<u>28.15</u> 28.13
1d	66.50	285-287	C ₂₇ H ₃₅ NO ₄ S ₅	<u>2.31</u> 2.34	<u>26.75</u> 26.81
1e	62.70	296-298	C ₂₉ H ₃₉ NO ₄ S ₅	<u>2.23</u> 2.24	<u>25.55</u> 25.61

Antimikrob aktivlik

Yeni sintez edilmiş birləşmələrin antimikrob aktivliyi *in vitro* şəraitdə tədqiq edilmişdir (cədvəl 2). Sınaqlar qrammüsbət bakteriyaların nümayəndələri kimi *Staphylococcus aureus* və *Bacillus subtilis*, qrammənfi bakteriyaların nümayəndələri kimi isə *Proteus vulgaris* və *Escherichia coli* üzərində aparılmışdır. Müqayisə preparatları kimi iki standart antibiotik - Ampisillin və Gentamisin istifadə edilmişdir. Həmçinin, birləşmələrin göbələk əleyhinə potensialı da tədqiq edilmişdir. Bu məqsədlə göbələk ştammlarından: sapşəkilli göbələklərdən (*Aspergillus fumigatus*) ova mayalardan (*Candida albicans*) istifadə olunmuşdur. Müqayisə preparatı kimi standart antibiotik - Amfoterisin B - tətbiq edilmişdir.

Birləşmələr 10 mq/ml (0.01 q/ml) konsentrasiyada, antimikrob aktivlik meyarı kimi inhibisiya zonasının diametri (mm ilə) istifadə edilməklə sınaqdan keçirilmişdir.

Nəticələr cədvəl 2-də təqdim edilmişdir. Bioloji skrining nəticələrinə əsasən, tədqiq olunan maddələr seçilmiş test-mikroorganizmlərə qarşı fərqli antimikrob fəallıq göstərmişdir.

Cədvəl 2

Sintez edilmiş birləşmələrin antimikrob aktivliyi

Birləşmələr	Göbələk ştammları		Qrammüsbət bakteriyalar		Qrammənfi bakteriyalar	
	C. albicans ATCC 10231	A. fumigatus RCMB 002568	S. Aureus RCMB 010012	B. subtilis NRRL B-543	Proteus vulgaris ATCC 13315	E. coli ATCC 25955
1a	16.3±1.5	17.8±0.6	20.1±0.4	17.2±0.8	20.6±1.4	21.1 ±0.3
1b	16.9±1.6	19.5±1.4	20.4±1.2	17.5±0.6	21.1±0.6	21.4±0.7
1c	17.8±0.6	17.1±1.0	20.6±0.4	17.6±0.2	21.2±0.5	22.1±0.3
1d	17.3±0.5	17.0±1.1	20.9±0.7	17.2±0.7	22.7±0.7	22.9±1.5
1e	18.9±1.1	18.2±0.7	21.1±1.3	18.8±0.8	23.7±1.5	24.2±0.8
Amphotricin B	25.7±1.3	24.8±1.4	-	-	-	-

Ampicillin	-	-	27.8±0.6	26.4±0.7	-	-
Gentamycin	-	-	-	-	25.7±0.9	29.6±1.3

Belə ki, bu birləşmələr həm sapşəkili göbələklərə (*Aspergillus fumigatus*), həm də təkhüceyrəli mayalara (*Candida albicans*) qarşı əhəmiyyətli funqisid fəallıq nümayiş etdirmişdir. Ən yüksək antifungal aktivlik birləşmə 1e-də müəyyən edilmiş, ondan sonra müvafiq olaraq 1d, 1c, 1b və 1a birləşmələrində aşkar edilmişdir.

Birləşmə 1e standart antibiotik olan Ampisillinlə müqayisədə qrammüsbət bakteriyalardan *Staphylococcus aureus*-a qarşı nisbən az fəallıq göstərmişdir. Bu sıralamada ondan sonra müvafiq olaraq digər birləşmələr bir-birinə yaxın aktivliyə malikdirlər.

Sınaqdan keçirilmiş qrammənfi bakteriyalardan *Proteus vulgaris* və *E. coli* qarşı 1e birləşməsi digər birləşmələrdən daha yüksək həssaslıq göstərmiş olsa da, standart antibiotik olan Gentamisinlə müqayisədə daha az həssaslıq göstərmişdir. Bu birləşmələrin antimikrob xassələrinə görə aktivlik sıralaması isə aşağıdakı kimi olmuşdur: 1e>1d>1c>1b>3a

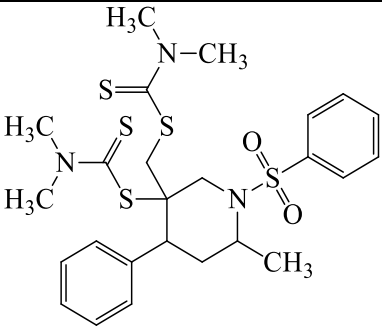
Sintez edilmiş 2-metil-4-fenil-1-(fenilsulfonil)piperidinlər əhəmiyyətli in vitro antimikrob aktivlik nümayiş etdirmişdir. Xüsusilə, 1c, 1d və 1e birləşmələri bakterial (o cümlədən *Staphylococcus aureus*, *Proteus vulgaris*, *E. Coli* və s.) və göbələk (o cümlədən *Aspergillus fumigatus*, *Candida albicans*) patogenlərinə qarşı effektivliyi ilə fərqlənmiş olsa da standart preparatları üstələməmişdirlər. Bu nəticələr, sözügedən birləşmələrin yeni antimikrob vasitələrin axtarışı istiqamətində böyük potensiala malik olduğunu sübut edir.

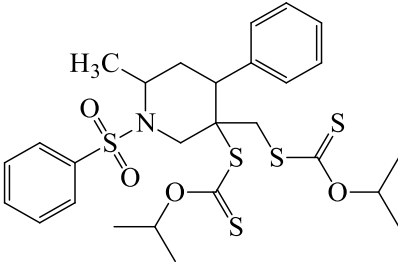
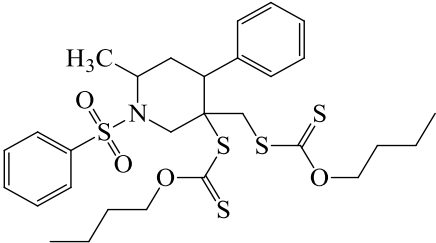
Molekulyar dokkinq analizi və MurA fermenti ilə qarşılıqlı təsir

Sintez edilmiş piperidin-sulfonamid törəmələrinin antibakterial potensialını molekulyar səviyyədə qiymətləndirmək üçün bakterial hüceyrə divarının sintezində həlledici rol oynayan MurA (UDP-N-asetilqlükozamin-1-karboksiviniltransferaza) fermenti ilə molekulyar dokkinq tədqiqatları aparılmışdır (PDB kodu: 1A2N). Analiz zamanı üç əsas törəmə müqayisə edilmişdir (cədvəl 3):

Cədvəl 3

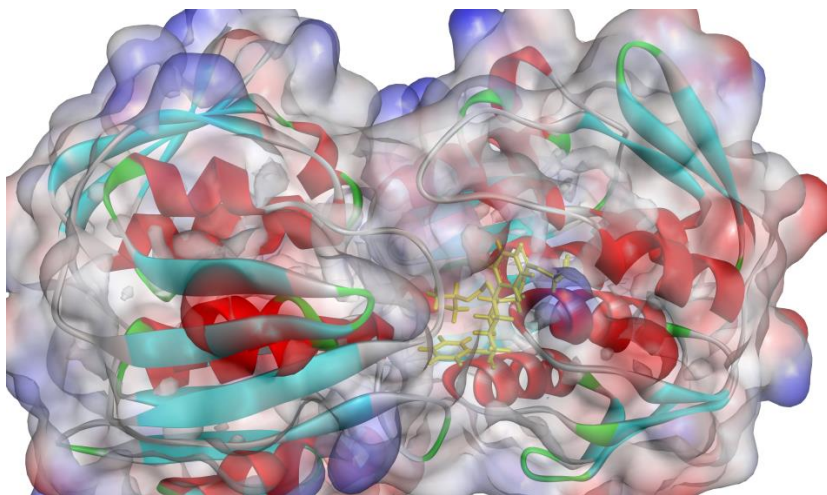
Molekulyar dokkinq analizi

Sıra №	Birləşmə (Liqand)	Struktur formulu	MurA (ΔG , kkal/mol)
1.	Birl. 1a (Liqand 1)		-5.3÷-6.4

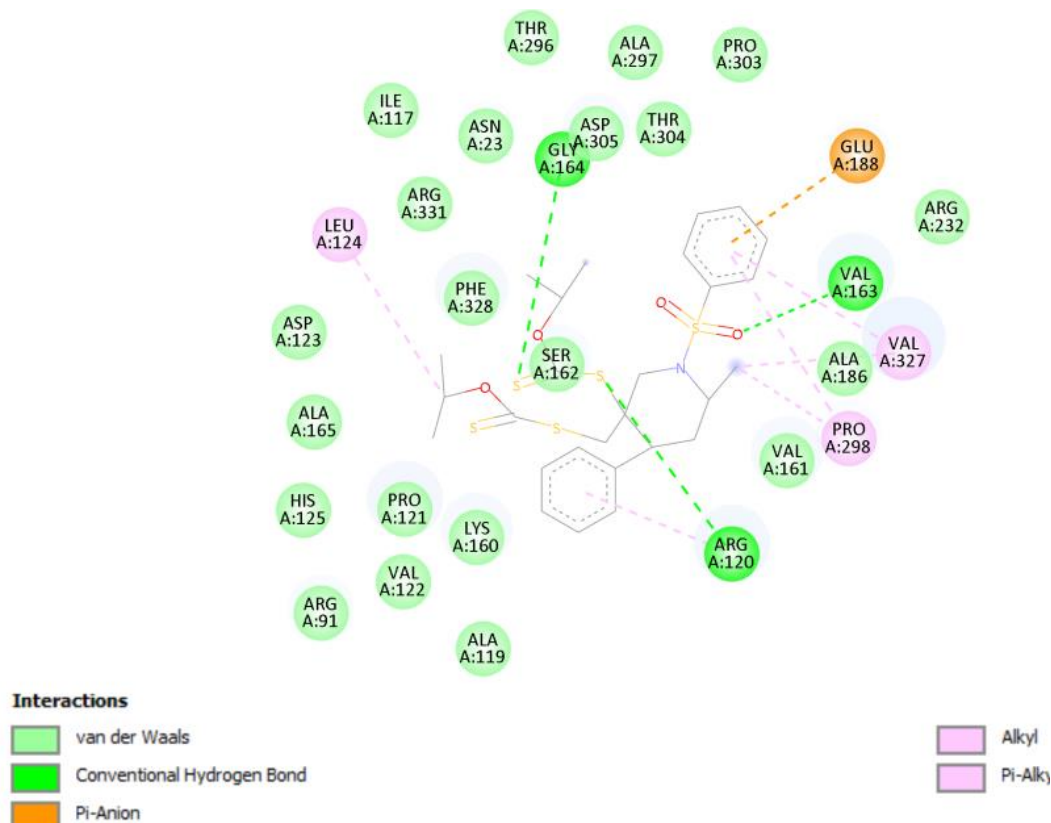
2.	Birl. 1d (Liqand2)		-4.5 ÷ -6.7
3.	Birl. 1e (Liqand 3)		-4.7 ÷ -6.8

Hesablamalar nəticəsində əldə edilən bağlanma enerjiləri (kkal/mol kkal/mol) göstərir ki, hər üç maddə MurA fermentinin aktiv mərkəzinə stabil şəkildə bağlanma qabiliyyətinə malikdir. L1 (dietilditiokarbamat törəməsi): Xlor atomlarının dietilditiokarbamat fraqmenti ilə əvəz olunduğu bu maddə üçün bağlanma enerjisi -6.4 kkal/mol səviyyəsində qeydə alınmışdır.

L2 (izopropil) və L3 (butil) törəmələri: Bu maddələr üçün ən yüksək bağlanma enerjisi müvafiq olaraq -6.7 kkal/mol və -6.8 kkal/mol təşkil etmişdir. Butil radikalının zəncir uzunluğunun artması hidrofob cümlərlə daha geniş təmasa şərait yaradaraq bağlanma enerjisinin cüzi artmasına səbəb olmuşdur.



Şəkil 2. Sintez olunmuş sulfamid törəməsinin (birl. 1d) MurA fermentinin (PDB ID: 1A2N) aktiv mərkəzində yerləşməsinin 3D vizuallaşdırılması. Zülalın ikincili strukturu lent, xarici səthi isə şəffaf molekulyar səth modeli ilə təsvir edilmişdir.

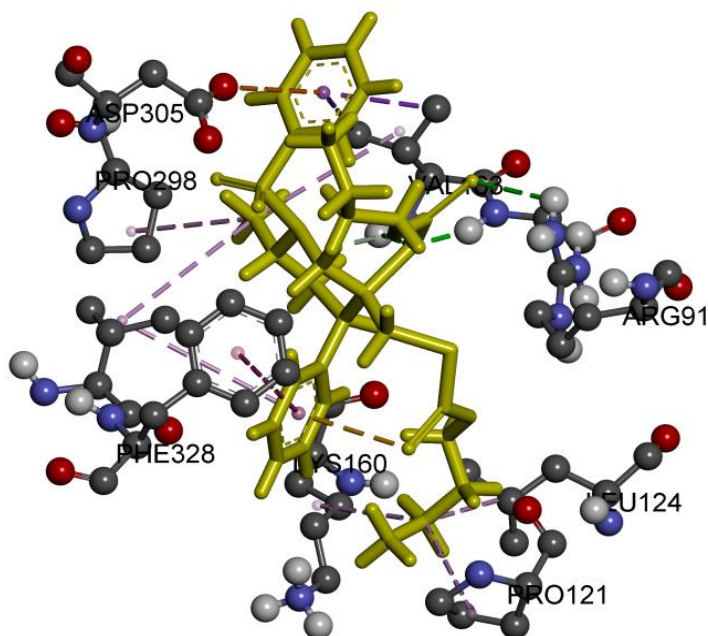


Şəkil 3. 1d birləşməsinin MurA fermentinin (PDB ID: 1A2N) aktiv mərkəzindəki amin turşusu qalıqları ilə qarşılıqlı təsirin 2D diaqramı. Hidrogen rabitələri yaşıl, π -anion əlaqələri narıncı, alkil və π -alkil qarşılıqlı təsirləri isə çəhrayı rəngli qırıq xətlərlə göstərilmişdir.

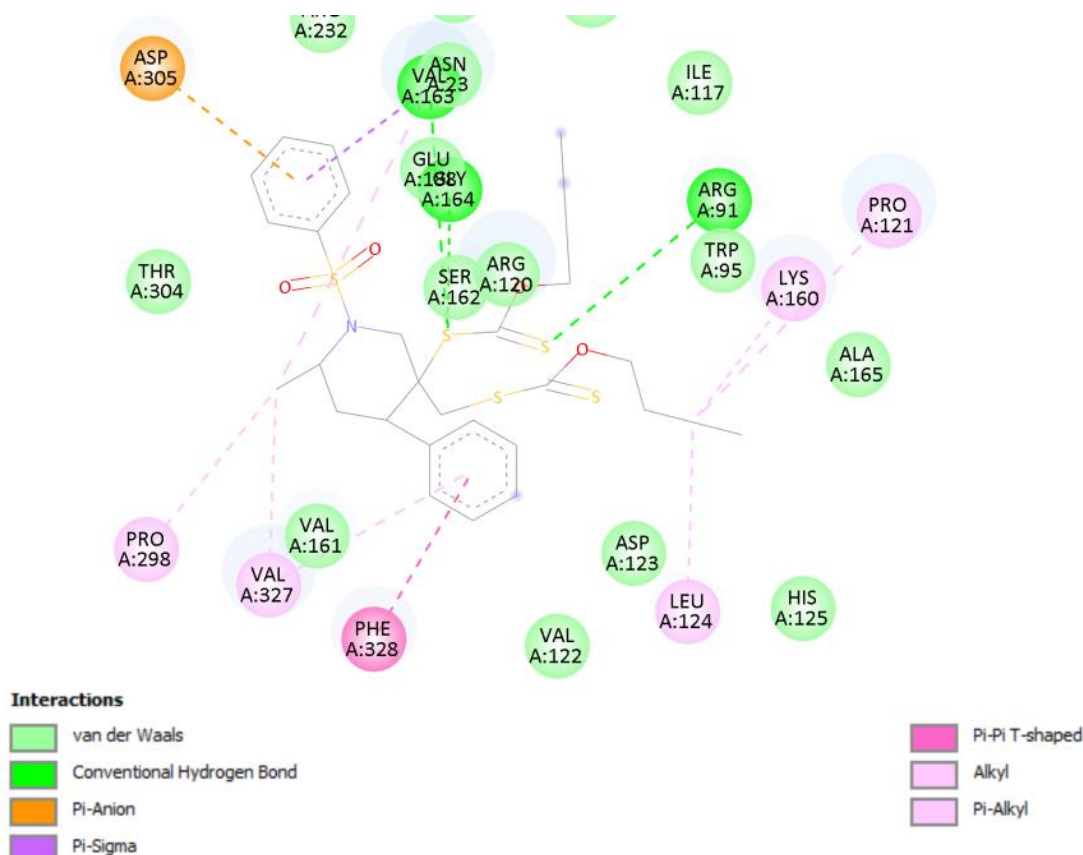
Molekulyar dokinq analizinin nəticələrinə əsasən (şəkil 2, 3), liqand MurA fermentinin aktiv mərkəzində ARG120, GLY164 VƏ VAL163 amin turşuları ilə stabil hidrogen rabitələri yaradır. Bundan əlavə, strukturun benzol halqası ilə Glu188 qalığı arasında π -anion qarşılıqlı təsiri müşahidə olunur ki, bu da kompleksin stabilliyini daha da artırır.

Dokinq tədqiqatlarına əsasən (şəkil 4), tərkibində butilksantogenat fraqmenti olan **1e** törəməsi MurA fermentinin aktiv mərkəzində stabil konformasiya yaradır. ASP305 və VAL163 qalıqları ilə yaranan hidrogen rabitələri, həmçinin PHE328 və PRO298 ilə hidrofob qarşılıqlı təsirlər kompleksin yüksək stabilliyini təmin edir. Molekulun kükürd atomlarının aktiv mərkəzdəki kation zonaları ilə koordinasiya inhibitor fəallığının yüksək olacağını proqnozlaşdırır.

Sintez olunmuş yeni ksantogenat törəməsinin MurA fermentinin (PDB ID: 1A2N) aktiv mərkəzində yerləşməsinin molekulyar dokinq analizi (şəkil 5) göstərir ki, liqand zülalın bağlanma sahəsində çoxşaxəli qeyri-kovalent rabitələr sistemi hesabına yüksək stabillik nümayiş etdirir. Mcule platformasında aparılan hesablamalar nəticəsində liqandın bağlanma enerjisi -6,8 kkal/mol olaraq müəyyən edilmişdir ki, bu da kompleksin termodinamik cəhətdən əlverişli olduğunu göstərir. Maddənin strukturundakı benzolsulfamid fraqmenti ilə ASP305 amin turşusu qalığı arasında yaranan narıncı rəngli π -anion qarşılıqlı təsiri liqandın mənfi yüklü nahiyyələrə qarşı spesifik orientasiyasını təmin edir, VAL163 ilə müşahidə olunan bənövşəyi rəngli π - σ rabitəsi isə aromatik sistemin zülal zənciri ilə əlavə stabilizasiyasına səbəb olur. Hidrogen rabitələri analiz edildikdə aydın olur ki, liqandın ksantogenat qrupları GLY164, VAL163 və ARG91 qalıqları ilə möhkəm klassik hidrogen rabitələri (yaşıl qırıq xətlər) yaradaraq kompleksin enerji göstəricilərini optimallaşdırır.



Şəkil 4. Sintez olunmuş ksantogenat törəməsinin(birl.1e) MurA fermentinin (PDB ID: 1A2N) aktiv mərkəzində 3D yerləşməsi və amin turşusu qalıqları ilə qarşılıqlı təsiri. Liqand sarı rəngli çubuq (stick) modeli ilə, amin turşuları isə ball-and-stick modeli ilə göstərilmişdir. Qırıq xətlər qeyri-kovalent rabitələri (hidrogen rabitələri, hidrofob və elektrostatik əlaqələr) ifadə edir.



Şəkil 5. 1e törəməsinin MurA fermentinin (1A2N) aktiv mərkəzindəki amin turşusu qalıqları ilə qarşılıqlı təsirinə 2D diaqramı. Rəngli kəsik xətlər qeyri-kovalent əlaqələri göstərir: yaşıl - hidrogen rabitələri; narıncı - π -anion; bənövşəyi - π - σ ; çəhrayı - alkil- π -alkil təsirləri.

Bundan əlavə, strukturun həm aromatik halqaları, həm də alifatik yan zəncirləri PHE328, VAL327, PRO298, LYS160 və LEU124 kimi amin turşuları ilə intensiv Alkil və π -alkil (çəhrayı xətlər) qarşılıqlı təsirlərinə girərək liqandın hidrofob "cibdə" sıx şəkildə fiksasiya olunmasını təmin edir.

Müşahidə olunan kompleks qarşılıqlı təsirlər, xüsusilə kükürd tərkibli funksional qrupların aktiv mərkəzin kation zonaları ilə yaxınlığı və stabil bağlanma enerjisi, tədqiq olunan maddənin MurA fermentinə qarşı yüksək inhibitor fəallığını şərtləndirən əsas amillərdir. Bu struktur xüsusiyyətləri həmin birləşmənin digər törəmələrlə müqayisədə bioloji sınaqlarda daha yüksək nəticə göstərməsini elmi cəhətdən əsaslandırır. Beləliklə, sulfonil ($-\text{SO}_2$) oksigenlərinin və kükürd atomlarının MurA-nın katalitik mərkəzindəki spesifik qalıqlarla hidrogen rabitəsi və Van-der-Vaals qüvvələri vasitəsilə bağlanması, bu maddələrin MurA inhibitorları kimi perspektivliyini təsdiq edir.

Nəticə. Bitki xəstəliklərinin aşkarlanması və torpaq nəmliyi təhlili üçün süni intellekt əsaslı kənd təsərrüfatı robotu Xloramin-B molekulunun həm elektrofil xlor, həm də nukleofil azot mənbəyi kimi universal reagent xüsusiyyətlərindən istifadə edilərək, allilxloridlə radikal birləşmə reaksiyası vasitəsilə yüksək reaksiya qabiliyyətli xlor atomlarına malik β -xlorosulfamid sintonu sintez edilmişdir. Bu aralıq məhsulun ditiokarbamat və ksantogenat tipli nukleofillərlə əvəzetmə reaksiyaları, ardınca isə benzasetonla heterosiklləşməsi nəticəsində yeni çoxfunksiyalı piperidinsulfamid törəmələri əldə olunmuşdur. Sintez edilmiş bütün birləşmələrin quruluşu element analizi, İQ və ^1H NMR spektroskopiyaya üsulları ilə təsdiq edilmiş, fiziki-kimyəvi sabitləri müəyyən edilmişdir. Çoxfunksiyalı piperidinsulfamid törəmələrinin antimikrob fəallığını həm laboratoriya şəraitində (*in vitro*), həm də kompüter modelləşdirilməsi (*in silico*) üsulları ilə müqayisəli şəkildə tədqiq edilmişdir.

Bioloji sınağın nəticələrinə əsasən, piperidin nüvəsinə kükürd tərkibli fraqmentlərin daxil edilməsi geniş spektrli antimikrob fəallığın yaranmasına səbəb olmuşdur. Aktivlik sıralaması butil > izopropil > etil radikalları istiqamətində artaraq $1e > 1d > 1c > 1b > 1a$ şəklində müəyyən edilmişdir. Xüsusilə 1e birləşməsi qrammənfi bakteriyalara (*E. coli* və *P. vulgaris*) qarşı ən yüksək həssaslıq (müvafiq olaraq 24.2 ± 0.8 mm və 23.7 ± 1.5 mm inhibisiya zonası) göstərmişdir.

In silico tədqiqatlar vasitəsilə sintez olunmuş maddələrin MurA fermentinə qarşı inhibitor fəallığı proqnozlaşdırılmışdır. 1e törəməsinin -6.8 kcal/mol bağlanma enerjisi ilə ASP305 və VAL163 qalıqları ilə stabil hidrogen rabitələri, eləcə də PHE328 və PRO298 ilə hidrofob qarşılıqlı təsirlər yaratması onun yüksək stabilliyini və inhibitor potensialını sübut edir.

Tədqiq olunan birləşmələrin effektivliyi standart antibiotiklərdən (Ampisillin, Gentamisin, Amfoterisin B) bir qədər aşağı olsa da, əldə edilən bağlanma enerjiləri və *in vitro* nəticələr bu strukturun optimallaşdırılması vasitəsilə gələcəkdə daha güclü və spesifik antimikrob maddələrin sintezi üçün əlverişli quruluşa malik olduğunu göstərir.

ƏDƏBİYYAT

1. Wiedemann B, Heisig A, Heisig P. Uncomplicated urinary tract infections and antibiotic resistance-epidemiological and mechanistic aspects. *Antibiotics*. 2014 Jul 22;3(3):341-52.
2. Neamati N, Mazumder A, Zhao H, Sunder S, Burke Jr TR, Schultz RJ, Pommier Y. Diarylsulfones, a novel class of human immunodeficiency virus type 1 integrase inhibitors. *Antimicrobial agents and chemotherapy*. 1997 Feb; 41(2):385-93.
3. Yousef F, Mansour O, Herbali J. Sulfonamides: Historical discovery development (structure-activity relationship notes). *In-vitro In-vivo In-silico Journal*. 2018 May 6;1(1):1-5.

4. Carullo G, Galligano F, Aiello F. Structure–activity relationships for the synthesis of selective cyclooxygenase 2 inhibitors: an overview (2009–2016). *MedChemComm.* 2017;8(3):492-500.
5. Zhang L, Lin D, Sun X, Curth U, Drosten C, Sauerhering L, Becker S, Rox K, Hilgenfeld R. Crystal structure of SARS-CoV-2 main protease provides a basis for design of improved α -ketoamide inhibitors. *Science.* 2020 Apr 24; 368(6489):409-12.
6. Zoltán Földi/ Eine neue Reaktion der aliphatischen Doppelbindung// *Eur. J. Inorg. Chem.* 1930, V. 63. №8. P. 2257-2269
7. Minakata S., Yoneda Y., Oderaotoshi Y., Komatsu M./ Unprecedented CO₂-Promoted Aminochlorination of Olefins with Chloramine-T// *Org. Lett.* 2006. V. 8. №5. P. 967-969
8. Великоросов А.В., Мочалин В.В., Мухин А.А./ Региоселективный синтез 3,5-дизамещенных 2-изоксазолов при реакции оксимов аренкарбольшедидов с пропаргл-N-фенилкарбоматом в присутствии хлорамина-Б.// *Материалы I Межд. Конф. «Химия и биологическая активность азотисных гетероциклов»*, 9-12 окт. 2001, т.2, с.52.
9. Khojayeve K.H., Najafova, Agayeva M.N., Zeynalova L.F./ Nucleophilic substitution of chlorine in haloid ethers and study of their bactericide properties. // *International journal of advanced research in science. Engineering and Technology*, v.4, issue 7, july 2017
10. Фарзалиев М.Ф., Мамедов С.А., Гусейнов И.Ш., Фатализаде Ф.А., Ладохина Н.П./ N-монохлорамида сульфокислот в синтезе 1-хлор-2-гидрокси-, алкокси- или карбоксиалкилов и их производных. // *Аз. хим. ж.* №1 2010. с.65-69.
11. Liu G.Q., Li Y.M. A new method for intramolecular chloramination of unfunctionalized olefins // *Synth. and Catal.* 2013. 355. No 2. P. 395-405.
12. Rosenzweig G.I., Rosenzweig I.V., Mirskaya A.I., Levkovskaya G.G. 2-phenylquinoxaline from 1-functionallysubstituted N-(2-phenyl-2,2-dichloroethyl)arylsulfonamides and ortho-phenylene-diamines // *J. Org. Chem.* 2006. 42. No 3. P. 470-471.
13. Koritomi M.D., Veriest G., De Kimpe N. Peru. Stereocontrolled synthesis of new 3-sulfonamide-3, 4, 5-tetrahydro-1,5-benzthiazolines from 2-(bromomethyl)- or 2-(sulfonyloxymethyl) aziridines // *Org. and Biomol. Chem.* 2008. V.6. No 11, P. 183-189.
14. Маммадова, С., Демир, Ю., Исрафилова, З., Зейналова, Л., Назаров, Н., Суджаев, А., Ладохина, Н., Димич, Д. и Гюльчин, И. (2025). Синтез, биологическая оценка и молекулярный докинг новых производных сульфонида в качестве двойных ингибиторов изоферментов карбоангидразы I/II и ацетилхолинэстеразы. *Журнал биохимической и молекулярной токсикологии*, 39, e70452. <https://doi.org/10.1002/jbt.70452>.
15. Zeynalova L.F., Mammadov S.A., Najafova R.A., Mammadova S.I., Ladokhina N.P. Chloramides of sulfoacids in the synthesis of N-alkylarylsulfamides // *Journal "Theoretical and Applied Science"*. USA. 2017. V.51. No 7. P. 47-54.
16. Mammadov S.A., Zeynalova L.F., Mammadova S.I., Ladokhina N.P., Mahmudova A.A., Baba-yev S.S. Some features of the monochloramines of sulphoacids with unsaturated compounds // *Az.Chem.J.* 2018. № 3. P 80-85.
17. Zeynalova L.F. The reaction products of butylacrylate and chloramine-B – synthons to produce multifunctional sulfamides and heterocycles. "YOUNG RESEARCHER" "2020, Volume VI, No. 1. P.38-44
18. Zeynalova L.F. Some features of nucleophilic substitution of chlorine atoms in N-2, 3-dichloroalkyl sulfamides and the study of the antimicrobial properties of the obtained

compounds. Milli Aviasiya Akademiyasının The perception subsystem is intended for acquiring and interpreting data on plant and soil conditions while the robot moves across the field. In the proposed system, it is implemented using a camera with neural network-based image analysis and contact-based soil moisture measurements. The outputs of this subsystem include detected disease symptoms with the predicted class, recognition confidence, and geographic coordinates, as well as a map of local moisture values transmitted to the operator in real time via the GCS.

lər jurnalı, 2021,23(4), səh.24-30.

19. Мамедова С.И., Ладохина Н.П., Аскерова К.Т., Аббасова Ш.Б., Мамедова Г.Г., Юябашева Л.Н. Синтез роданид-и тиокарбонилироизводных 1-фенилсульфамидо-N-2-йод-3-хлорпропана. Научный журнал «Elmi Məcmuə» Национальной Академии Авиации, 2023, 25(3) стр.9-15.
20. Мамедова С.И., Ладохина Н.П., Аскерова К.Т., Аббасова Ш.Б., Меликова Дж.Б. (2022). Синтез и свойства многофункциональных сульфамидов на основе синтона – 1-фенилсульфамидон-2-йод-3 – хлорпропана. *Scientific Journal of National Aviation Academy*, 24(3), 54-62

REFERENCES

1. Wiedemann B, Heisig A, Heisig P. Uncomplicated urinary tract infections and antibiotic resistance-epidemiological and mechanistic aspects. *Antibiotics*. 2014 Jul 22;3(3):341-52.
2. Neamati N, Mazumder A, Zhao H, Sunder S, Burke Jr TR, Schultz RJ, Pommier Y. Diarylsulfones, a novel class of human immunodeficiency virus type 1 integrase inhibitors. *Antimicrobial agents and chemotherapy*. 1997 Feb; 41(2):385-93.
3. Yousef F, Mansour O, Herbali J. Sulfonamides: Historical discovery development (structure-activity relationship notes). In-vitro In-vivo In-silico Journal. 2018 May 6;1(1):1-5.
4. Carullo G, Galligano F, Aiello F. Structure–activity relationships for the synthesis of selective cyclooxygenase 2 inhibitors: an overview (2009–2016). *MedChemComm*. 2017;8(3):492-500.
5. Zhang L, Lin D, Sun X, Curth U, Drosten C, Sauerhering L, Becker S, Rox K, Hilgenfeld R. Crystal structure of SARS-CoV-2 main protease provides a basis for design of improved α -ketoamide inhibitors. *Science*. 2020 Apr 24; 368(6489):409-12.
6. Zoltán Földi/ Eine neue Reaktion der aliphatischen Doppelbindung// Eur. J. Inorg. Chem. 1930, V. 63. №8. P. 2257-2269
7. Minakata S., Yoneda Y., Oderaotoshi Y., Komatsu M./ Unprecedented CO₂-Promoted Aminochlorination of Olefins with Chloramine-T// Org. Lett. 2006. V. 8. №5. P. 967-969
8. Velikorosov A.V., Mochalin V.V., Mukhin A.A./ Regioselektivniy sintez 3,5-dizameshennikh 2- izoksazolov pri reaktsii oksimov arenkarboldegidov s propargil-N-fenilkarbomatom v prisutsvii khloramina -B.// Materiali I Mej. Konf. “Kimiya i biologicheskaya aktivnost azotisnikh geterotsiklidov”, 9-12 okt. 2001, t.2, s.52.
9. Khojayeve K.H., Najafova, Agayeva M.N., Zeynalova L.F./ Nucleophilic substitution of chlorine in haloid ethers and study of their bactericide properties. // Interniotal journal of advanced research in science. Engineering and Technology, v.4, issue 7, july 2017

10. Farzaliev M.F., Mamedov S.A., Guseynov I.Sh., Fatalizade F.A., Ladokhina N.P./ N-monokhloramidi sulfokislöt v sinteze 1-khlör-2- gidroksi-, alkoksi- ili karboksialkilov i ikh proizvodnikh.// Az. khim. j. №1 2010. s.65-69.
11. Liu G.Q., Li Y.M. A new methog for intramolecular chloramination of unfunctionalized olefins // Synth. and Catal. 2013. 355. No 2. P. 395-405.
12. Rosenzveig G.I., Rosenzveig I.V., Mirskaya A.I., Levkovskaya G.G. 2-phenylquinoxaline from 1-functionallysubstituted N-(2-phenyl-2,2-dichlorethyl)arylsulfonamides and ortho-phenyle-nediamines // J. Org. Chem. 2006. 42. No 3. P. 470-471.
13. Koritomi M.D., Veriest G., De Kimpe N. Peruö. Stereocontrolled synthesis of new 3-sulfonamide-3, 4, 5-tetrahydro-1,5-benzthiazolines from 2-(bromomethyl)- or 2-(sulfonyloxymethyl) aziridi-nes // Org.and Biomol.Chem. 2008. V.6. No 11, P. 183-189.
14. Mammadova, S., Demir, Yu., Israfilova, Z., Zeynalova, L., Nazarov, N., Sudjaev, A., Ladokhina, N., Dimich, D. i Gyulchin , I. (2025). Sintez, biologicheskaya otsenka i molekulyarniy doking novikh proizvodnikh sulfonamida v kachestve dvoynikh ingibitorov izofermentov karboangidrazi I/II i atsetilkholinesterazi. Jurnal biokhimicheskoy i molekulyarnoy toksikologii, 39, e70452. <https://doi.org/10.1002/jbt.70452>.
15. Zeynalova L.F., Mammadov S.A., Nacafova R.A., Mammadova S.İ., Ladokhina N.P. Clorami-des of sulfoacids in the synthesis of N-alkylarylsulfamides // Journal "Theoretical and Applied Sci-ence". USA. 2017. V.51. No 7. P. 47-54.
16. Mammadov S.A., Zeynalova L.F., Mammadova S.İ., Ladokhina N.P., Mahmudova A.A., Baba-yev S.S. Some features of the monochloramines of sulphoacides with unsaturated compounds // Az.Chem.J. 2018. № 3. P 80-85.
17. Zeynalova L.F. The reaction produkts of butylacrylate and chloramine-B – synthons to produce multifunctional sulfamides and heterocycles. "YOUNG RESEARCHER" "2020, Volume VI, No. 1. P.38-44
18. Zeynalova L.F. Some features of nucleophilic substitution of chlorine atoms in N-2, 3-dichloroalkyl sulfamides and the study of the antimicrobial properties of the obtained compounds. Milli Aviasiya Akademiyasinin Elmi Mejmueler jurnalı, 2021,23(4), seh.24-30.
19. Mamedova S.I., Ladokhina N.P., Askerova K.T., Abbasova Sh.B., Mamedova G.G., Yuzbashova L.N. Sintez rodanid – i tiokarboniliroizvodnikh 1-fenilsulfamido-N-2- yod-3-khlörpropana. Nauchniy jurnal "Elmi Mejmue " Natsionalnoy Akademii Aviatsii, 2023, 25 (3) str.9-15.
20. Mamedova S.I., Ladokhina N.P., Askerova K.T., Abbasova Sh.B., Melikova Dj.B. (2022). Sintez i svoystva mnogofunktsionalnikh sulfamidov na osnove sintona-1-fenilsulfamidon -2-yod- 3-khorpropana. Nauchniy jurnal "Elmi Mejmue " Natsionalnoy Akademii Aviatsii, 24(3), 54-62.

***in vitro* BIOLOGICAL TESTING OF NEWLY SYNTHESIZED
ARYLSULFONYLPYPERIDINE DERIVATIVES AND *in silico* RESEARCH OF THEIR
INHIBITORY POTENTIAL AGAINST MurA ENZYME**

¹Mammadova S.I., ²Zeynalova L.F., ²Mammadova G.H., ¹Askarova K.T.,
¹Agazade A.A., ¹Ladokhina N.P.

¹Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan
"Institute of Chemistry" Institute of Chemistry, Public Legal Entity, ²Azerbaijan State
Pedagogical University

The aim of the research is the synthesis of novel piperidinesulfonamide derivatives, determination of their structure-activity relationship (SAR), and a comparative study of their antimicrobial activity via *in vitro* and *in silico* methods to identify new molecular structures with high inhibitory potential.

For this purpose, novel piperidinesulfonamide derivatives were synthesized via nucleophilic substitution of a highly reactive synthon, obtained from the interaction of Chloramine-B with allyl chloride, using dithiocarbamate and xanthate salts, followed by heterocyclization with benzalacetone. During *in vitro* screening, the compounds exhibited distinct biological activity against Gram-positive (*S. aureus*, *B. subtilis*) and Gram-negative (*P. vulgaris*, *E. coli*) bacteria, as well as pathogenic fungi (*A. fumigatus*, *C. albicans*). It was established that the incorporation of pharmacophoric xanthate and dithiocarbamate fragments into the piperidine core significantly expands the spectrum of antimicrobial activity.

Molecular docking analysis (PDB ID: 1A2N) revealed that the synthesized ligands formed stable adducts within the active site of the MurA enzyme, which plays a crucial role in bacterial cell wall biosynthesis, with favorable binding energies ranging from -6.4 to -6.8 kcal/mol. Notably, the butylxanthate derivative, 2-methyl-4-phenyl-1-(phenylsulfonyl)-5-butylxanthate-5-(butylxanthatemythyl)piperidine (**1e**), demonstrated the highest efficacy in both evaluation methods by establishing stable hydrogen bonds and π -anion interactions with ARG120, GLY164, VAL163, and ASP305 amino acid residues. Structure-activity relationship (SAR) analysis confirms that increasing the length of the aliphatic side chain ensures tighter binding within the hydrophobic pockets, thereby enhancing the inhibitory potential. The obtained results prove that these types of sulfonamide compounds represent a promising synthon for the development of next-generation antimicrobial agents.

Keywords: arylsulfonamides, piperidine derivatives, xanthates, dithiocarbamates, molecular docking, MurA inhibitors, antimicrobial activity.

Müəlliflər haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Məmmədova Sevgili İsmayıl qızı	“Kimya İnstitutu”PHŞ	k.f.d., laboratoriya müdiri	m.i.sevgili@mail.ru mob: (+994) 55 388-98-55
Zeynalova Lalə Fəxrəddin qızı	Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti	Sabiq doktorant	zlali@inbox.ru mob: (+994) 55-610-34-63
Məmmədova Gülnar Hacıməmməd qızı	Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti	Sabiq doktorant	gulnarmemmedova1987@gmail.com mob: (+994) 51 980-61-78
Əsgərova Kəmalə Tağı qızı	“Kimya İnstitutu” PHŞ	Elmi işçi	kamalaasgarova@yandex.com mob: (+994) 77 420-07-89
Ağazadə Anar Əkrəm oğlu	“Kimya İnstitutu” PHŞ	doktorant	anaragazade2002@gmail.com mob: (+994) 50 792-66-55
Ladokhina Nina Petrovna	“Kimya İnstitutu” PHŞ	k.f.d., aparıcı elmi işçi	ninalad70@gmail.com mob: (+994) 50 554-99-70

**DƏMİRYOL STANSİYALARININ İSTİSMAR ETİBARLILIĞINI
QIYMƏTLƏNDİRMƏK ÜÇÜN MÖVCUD METOD VƏ MODELƏRİN TƏHLİLİ**

Manafov E.K.

Milli Aviasiya Akademiyası

Məqalədə infrastrukturunun texniki vəziyyəti daşıma prosesinin keyfiyyəti ilə birbaşa bağlı olan və mürəkkəb sosial-texniki sistemlər sayılan dəmiryol stansiyalarının istismar etibarlılığının qiymətləndirilməsi üçün mövcud metod və modellərin ətraflı təhlili təqdim olunur. Göstərilmişdir ki, stansiyanın istismar etibarlılığı ayrıca bir avadanlığın etibarlılığından əsaslı şəkildə fərqlənir. Stansiyanın əksər nasazlıqları tam imtinaya səbəb olmur, ağırlaşmış rejimlərə (sürət məhdudiyyətləri, marşrutların bağlanması, əl ilə idarəetmə prosedurlarına keçid) gətirib çıxarır ki, bu da buraxma qabiliyyətinin pisləşməsinə, gecikmələrin çoxalmasına və əməliyyat risklərinin artmasına səbəb olur. Buna əsaslanaraq, stansiyanın istismar etibarlılığı anlayışı nasazlıqlar, bərpa və iş şəraitində dəyişikliklər zamanı tələb olunan iş səviyyəsini qorumaq qabiliyyəti kimi aydınlaşdırılır.

Bu sahədə istifadə olunan əsas metod sinifləri (nasazlıq təhlilinin keyfiyyət metodları, səbəb-nəticə modelləri, struktur etibarlılıq diaqramları, Markov və yarı Markov modelləri, stoxastik Petri şəbəkələri, Bayes şəbəkələri, statistik və məlumatlara əsaslanan yanaşmalar və diskret hadisə simulyasiya modelləşdirməsi) sistemləşdirilmişdir. Müqayisəli təhlil stansiyanın tətbiq meyarlarına, tələb olunan məlumatlara, həmçinin bərpa, marşrut strukturu, ağırlaşmış rejimlər və əməliyyat göstəricilərini nəzərə almaq qabiliyyətinə əsaslanaraq aparılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, nəzərdən keçirilən yanaşmaların heç biri stansiyanın istismar etibarlılığının tam və adekvat qiymətləndirilməsini təmin etmir.

Nasazlıqların və bərpanın statistik qiymətləndirilməsini, alt sistemin mövcudluğunun və marşrut etibarlılığının modelləşdirilməsini və stansiyanın iş axınının simulyasiyasını birləşdirən hibrid arxitekturanın mümkünlüyü ilə bağlı nəticə əsaslandırılmışdır. Metodların seçilməsi, mənbə məlumatlarının strukturu, modelin təsdiqlənməsi və nəticələrin istismar fəaliyyətlərində tətbiqi üçün praktik tövsiyələr təklif edilmişdir.

***Açar sözlər:** istismar etibarlılığı, dəmiryol stansiyası, imtina, bərpa, RAMS, rejimlər, buraxma qabiliyyəti, simulyasiya modelləşdirməsi.*

1. Giriş

Dəmiryol stansiyaları qatarların qəbulunu, göndərilməsini, emalını və birbaşa buraxılmasını, eləcə də manevr əməliyyatlarını və hərəkət marşrutunun formalaşdırmasını təmin edən əsas infrastruktur elementləridir. Daşımaların artması, planlaşdırmanın mürəkkəbləşməsi, dəqiqlik və xidmət keyfiyyətinə artan tələblər stansiya etibarlılığını nəqliyyat prosesinin dayanıqlığında mühüm amilə çevirir. Eyni zamanda, stansiyanın istismar etibarlılığı ayrıca bir avadanlığın etibarlılığından əsaslı şəkildə fərqlənir: stansiyanın əksər nasazlıqları tam imtinaya səbəb olmur, ağırlaşmış rejimlərə (sürət məhdudiyyətləri, marşrutların bağlanması, əl ilə idarəetmə prosedurlarına keçid) gətirib çıxarır

ki, bu da buraxma qabiliyyətinin pisləşməsinə, gecikmələrin çoxalmasına və əməliyyat risklərinin artmasına səbəb olur.

Dəmiryol sahəsində etibarlılığın idarə edilməsinin müasir təcrübəsi IEC 62278/EN 50126 və əlaqəli standartlarda təsbit edilmiş RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety - Etibarlılıq, Əlçatanlılıq, Təmirəyararlılıq, Təhlükəsizlik) konsepsiyasına əsaslanır. RAMS dəmiryolu sistemlərinin etibarlılıq, hazırlılıq, təmirəyararlılıq və təhlükəsizlik göstəricilərinin xüsusiyyətləri, təsdiqi və istifadəsi üçün tələbləri formalaşdırır. Qatarların hərəkətinin idarə olunması və işarəvermə altsistemləri üçün normativ çərçivə isə əlavə olaraq proqram təminatı və elektron sistemlərin təhlükəsizliyi üçün tələbləri müəyyən edən standartlarla tamamlanır. Lakin, sistem və altsistem səviyyəsində RAMS yanaşmasının inkişafına baxmayaraq, dəmiryolu stansiyalarının istismar etibarlılığını dəqiq qiymətləndirmək məsələsi metodoloji cəhətdən aktual olaraq qalmaqdadır. Stansiya sosial-texniki sistemdir, burada imtinaların təsiri tək avadanlıqların bərpasının tezliyi və müddəti ilə deyil, həm də yol topologiyası, marşrutlaşdırma məntiqi, cədvəl xüsusiyyətləri, alternativ marşrutların mövcudluğu və təmir resurslarının təşkili ilə də müəyyən edilir [1].

Dəmiryol qurğularının etibarlılığını qiymətləndirmək üçün elmi və tətbiqi ədəbiyyatlarda geniş çeşiddə metodlar verilmişdir. Klassik alətlərə aid olan imtinaların növləri və nəticələrinin təhlili (FMEA-Failure Mode and Effects Analysis/FMECA-Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), həmçinin imtinalar ağacı (FTA-Fault Tree Analysis) metodları imtina senarilərini strukturlaşdırmaq və kritik elementləri müəyyən etmək üçün tətbiq olunur [2]. Markov modelləri bərpa edilə bilən sistemlərin hazırlığını və performansını kəmiyyətə qiymətləndirmək üçün geniş istifadə olunur. Bu da "normal - degradasiya - imtina" vəziyyətləri və təmir prosesləri arasındakı keçidlərin nəzərə alınmasına imkan verir. Paralellik, asılılıqlar və bərpa resursları uğrunda rəqabətin daha ətraflı təsviri üçün dəmiryolu sistemlərinin texniki xidməti və əlçatanlığının modelləşdirilməsi məsələlərində effektivlik göstərən stoxastik Petri şəbəkələrindən istifadə olunur. Əlavə olaraq, xüsusilə vacib infrastruktur elementləri üçün imtina və bərpalar haqqında tarixi məlumatların təhlilinə əsaslanan statistik və məlumatlara əsaslanan (data-driven) yanaşmalar da inkişafdadır [1, 3, 4].

Sadələndirən metodlar çox vaxt ya fərdi qurğu (yaxud altsistemlərin) səviyyəsinə, yaxud da stansiyanın istismar göstəriciləri ilə birbaşa əlaqələndirmə olmadan qiymətləndirilməyə yönəldilir. Marşrutlaşdırma qovşağı sayılan stansiya üçün xidmət yönümlü göstəricilər daha vacibdir: marşrutların əlçatanlığı (marşrutlaşdırma qabiliyyəti), buraxma qabiliyyətində gözlənilən itkilər, imtinalar zamanı gecikmələr və texnoloji proseslərin aparılma dayanıqlılığı. Son illərdə, qatar marşrutlarını "xidmət vahidi" kimi istifadə edən və infrastruktur imtinalarının nəticələrini qiymətləndirən modellər də daxil olmaqla, texniki nasazlıqları istismar səmərəliliyi itkiləri ilə əlaqələndirən məhsuldarlıq təhlili yanaşması geniş vüsət almışdır [5]. Paralel olaraq, təsadüfi pozuntuların və imtinaların buraxma qabiliyyətinə təsirini qiymətləndirmək üçün diskret-hadisə simulyasiya modellərindən (DES-Diskret Event Simulation) istifadə olunur. Bu modellər ağırlaşmış rejimlərdə texnoloji proses səviyyəsində gecikmələri, növbələri, ziddiyətli marşrutları və stansiyanın iş rejimini ölçməyə qadirdir [6].

Beləliklə, dəmiryol stansiyalarının istismar etibarlılığını qiymətləndirmək üçün mövcud metod və modelləri sistemləşdirmək, marşrut strukturu və ağırlaşmış rejimlər şəraitində onların tətbiqini və məhdudiyyətlərini müəyyən etmək, həmçinin qiymətləndirmənin məqsədindən (hazırlıq, təhlükəsizlik, buraxma qabiliyyəti, gecikmələr, iqtisadi effekt) asılı olaraq yanaşmanın seçilməsi meyarlarını formalaşdırmaq aktual elmi və praktiki məsələlərdəndir. Məqalənin yazılmasından da məqsəd dəmiryol stansiyalarının istismar etibarlılığını qiymətləndirmək üçün yuxarıda qeyd olunan məsələlərin araşdırılması və çatışmazlıqların aradan qaldırılması istiqamətində təkliflər irəli

sürülməsidir.

2. Məsələnin qoyuluşu

İstismar etibarlılığı kontekstində dəmiryol stansiyası texniki avadanlıqları (yollar, yolayırıcılar, işarəvermə və rabitə sistemi, enerji təchizatı sistemi və s.), texnoloji prosesləri (qəbul və göndərmə, manevr, çeşidləmə əməliyyatları və s.) və personalın fəaliyyətini birləşdirən vahid sosial-texniki sistemdir. Xətti sahələrdən fərqli olaraq stansiya marşrut asılılıqlarının yüksək sıxlığı (boğazcıqlar, parklar, platformalar, çeşidləmə və manevr sahələri) ilə xarakterizə olunur və əksər imtinalar tam dayanmaya deyil, ağırlaşmaya gətirib çıxarır ki, bu da buraxma yaxud emal qabiliyyətinin itirilməsi və gecikmələrə səbəb olur. Buna görə də, stansiyanın istismar etibarlılığının qiymətləndirilməsi RAMS məntiqinə əsaslanmalı və eyni zamanda xidmət yönümlü göstəriciləri (nəqliyyat prosesinin keyfiyyətini) nəzərə almalıdır [1].

Stansiya üçün komponentin texniki imtinası və istismar nəticələrini fərqləndirmək prinsipial olaraq vacibdir: təhlükəsizliklə bağlı imtinalar (safety-related), stansiyanın hazırlıq və əlçatanlığını azaldan imtinalar (availability), məhsuldarlığın azalmasına və marşrutlaşdırmanın itirilməsinə səbəb olan imtinalar. Məsələnin elmi qoyuluşu və modelin seçilməsi üçün stansiyanın istismar etibarlılığının göstəricilərini RAM (Reliability Availability Maintenance) göstəricilərinə və məhsuldarlıqla bağlı istismar KPI (Key Performance Indicators) göstəricilərinə bölmək daha məsləhətdir. Elementlər səviyyəsində RAM göstəriciləri:

- MTBF (Mean Time Between Failures)/imtinaların intensivliyi (λ) - imtinasızlığı xarakterizə edir;

- MTTR (Mean Time To Repair)/bərpa müddətinin paylanması - təmirə yararlılığı xarakterizə edir;

- hazırlıq əmsalı (Availability) - RAMS baxımından "işləmə qabiliyyəti + bərpa" integral göstəricisi [1].

Stansiya səviyyəsində xidmətin istismar göstəriciləri:

- marşrutlaşdırma və marşrutların əlçatanlığı - verilən hərəkət üçün mümkün marşruta malik olma ehtimalı (xüsusilə də boğazcıqlar və əsas marşrut yolları üçün);

- buraxma və emal qabiliyyəti - verilmiş məhdudiyyətlər altında vaxt vahidinə düşən qatarların yaxud əməliyyatların sayı;

- dəqiqlik və gecikmələr - orta gecikmə, gecikmələrin paylanması, gecikmə həddini aşma ehtimalı;

- cədvəl dayanıqlığı və ağırlaşmalara qarşı həssaslıq.

"RAM $\rightarrow$ istismar nəticələri" əlaqəsi çox vaxt məhsuldarlıq kimi formalaşdırılır. Xidmət keyfiyyəti (məsələn, gecikmə və buraxma qabiliyyəti) infrastrukturun sağlamlıq vəziyyətlərinin və bərpa proseslərinin funksiyası kimi qəbul edilir. Bu yanaşma bizə "ikili" etibarlılıqdan uzaqlaşmağa və xidmət keyfiyyətinin pisləşdiyi lakin, sistemin formal olaraq işlək olduğu ağırlaşmış rejimləri nəzərə almağa imkan verir [7].

3. Dəmiryol stansiyalarının istismar etibarlılığını qiymətləndirmək üçün metodların icmalı və təsnifatı

Dəmiryolu stansiyasının istismar etibarlılığını qiymətləndirmək üçün "elementlərin etibarlılığı"ndan "xidmət təminatının etibarlılığı"na keçid tələb olunur. Ağırlaşmış rejim şəraitlərində imtinalar və onların bərpası zamanı stansiya texnoloji əməliyyatların yerinə yetirilməsini təmin etməlidir. RAMS məntiqində etibarlılıq, hazırlıq və təmirəyararlılıq dəmiryol sisteminin həyat dövrü ərzində spesifikasiyaya və təsdiqə tabe olan qarşılıqlı əlaqəli xüsusiyyətlər hesab olunur [1].

3.1. Keyfiyyət metodları: FMEA/FMECA, HAZOP, yoxlama cədvəlləri

FMEA, FMECA (Kritiklik də daxil olmaqla, imtina növlərinin və nəticələrinin təhlili) etibarlılıq və risklərin ilkin təhlilinin əsas metodlarına aiddir. Standartlaşdırılmış təfsirdə FMEA və FMECA səbəbləri, nəticələri və onların qarşısının alınmasının mümkün tədbirlərini təsbit etməklə "obyektin yaxud prosesin necə imtina edə biləcəyini" müəyyən etmək üçün istifadə olunur [8]. Stansiya üçün FMEA altsistemlər (yolayıcılar, rels dövrələri, təmas şəbəkəsi, rabitə, işarəvermə və bloklama sistemləri) üzrə imtinaları sistemləşdirmək və onları istismar nəticələri (marşrutun bağlanması, sürətin azaldılması, əl ilə idarəetməyə keçid) ilə əlaqələndirmək üçün bir vasitə kimi əlverişlidir. Metodun üstünlükləri "element → imtina → nəticələr → tədbirlər" şəffaf strukturunun tətbiqi, statistik çatışmazlıq halında ekspert qiymətləndirmələrinin daxil edilməsi imkanı, təhlükə (yaxud imtinaların) və tədbirlərin izlənməsi tələb olunan RAMS prosesi ilə yaxşı uyğunluğudur. Metodun çatışmazlıqları aşağıdakılardır: metod "lokal"dır və sistemli təsir sualına cavab verməkdə daha az effektivdir (məsələn, yolayıcının sıradan çıxması stansiyanın müəyyən bir topologiyada verilmiş qatar axınını idarə etmək qabiliyyətini necə dəyişdirəcək); kritiklik çox zaman yarıkəmiyyətə qiymətləndirilir ki, bu da faktiki KPI-larla (gecikmələr, buraxma qabiliyyəti) müqayisə etməyi çətinləşdirir; böyük miqdarda qurğular üçün FMEA nəticələrin parçalanması və təsnifatında ciddilik tələb edir.

HAZOP (Hazard and Operability Study), nə-əgər, yoxlama cədvəlləri adətən texnoloji proseslərdə təhlükələri və əməliyyat sapmalarını müəyyən etmək üçün istifadə olunur. Stansiya üçün bu yanaşmaların dəyəri "təşkilati və prosedur təbəqəsi"nin açıq şəkildə nəzərə alınmasındadır. Məsələn, ağırlaşmış rejimlərə keçid prosedurlarındakı hansı sapmalar bərpa vaxtının və ikinci dərəcəli gecikmələrin maksimal itkisinə səbəb olur.

3.2. Səbəb-nəticə modelləri. FTA və ETA

FTA (Fault Tree Analysis - İmtinalar Ağacının Təhlili) səbəb-nəticə əlaqələrini "yuxarı hadisə" (məsələn, "boğazcıqdan keçən marşrutun qurulma mümkünsüzlüyü" yaxud "marşrutlaşdırmanın idarə edilməsinin itirilməsi") və məntiqi qapılarla əlaqələndirilmiş əsas hadisələr vasitəsilə formalaşdırır. IEC beynəlxalq standartı FTA-nın əsas prinsiplərini, icra mərhələlərini və riyazi əsaslarını, eləcə də digər etibarlılıq metodları ilə əlaqəsini təsvir edir [9]. Stansiya üçün FTA aşağıdakı hallarda faydalıdır: minimal en kəsikləri seçmək və kritik elementləri sıralamaq; hansı imtinaların marşrutların qadağan edilməsinə və təhlükəsiz vəziyyətə keçidə gətirib çıxaracağını əsaslandırmaq (xüsusilə işarəvermə və bloklama sistemləri üçün) tələb olunduqda.

ETA (Event Tree Analysis - Hadisələr Ağacının Təhlili) başlanğıc hadisədən yaranan nəticələrin inkişafını (məsələn, "Elektrik mərkəzləşməsi postunda qidalanmanın kəsilməsi" yaxud "yolun yanlış tutulu göstərilməsi"), maneələrin və hərəkətlərin uğurlu yaxud uğursuzluğuna görə senarilərin şaxələnməsini nəzərə alır. IEC 62502 hadisə ağaclarının qurulma prinsiplərini, həmçinin onların etibarlılıq və risk göstəriciləri kontekstində keyfiyyət və kəmiyyət təhlili üçün istifadəsini təsbit edir [10].

FTA və ETA-nın üstünlükləri aşağıdakılardır: "Qadağan məntiqi" və funksiya imtinasının struktur səbəbləri (o cümlədən bir-birinə bağlı məntiqdə) üçün FTA tətbiqi rahatdır; senarilərin şaxələnməsini qiymətləndirmək lazım gəldikdə ETA FTA-nı tamamlayır (böyük ləngimələr yaxud uzunmüddətli səmərəsiz dayanmalarda personal, ehtiyatlanma, idarəetmə prosedurları ağırlaşmanın inkişafını hansı effektivliklə məhdudlaşdırır). FTA və ETA-nın çatışmazlıqları aşağıdakılardır: baza şəkilli FTA və ETA modelləri bərpa dinamikasını, təmir resursları uğrunda rəqabəti və hissəvi işəyararlılıq rejimlərini daha pis təsvir edir. Bu, stansiya üçün vacibdir. Əslində funksiya "yox olmur", əksinə pisləşir (mövcud marşrutların sayı azalır, intervallar artır). Bu da dinamik və ya hibrid modellər tələb edir.

3.3. Struktur modellər: RBD və qrafik, marşrut modelləri

RBD (*Reliability Block Diagram - Etibarlılıq Blok Diagramı*) etibarlılıq, hazırlıq və imtina göstəricilərini hesablamaq üçün ardıcıl yaxud paralel strukturlardakı blokların kombinasiyası kimi bir sistemi təmsil edir. IEC 61078 keyfiyyət və kəmiyyət təhlili üçün RBD tətbiqinin tələb və prosedurlarını müəyyən edir [11].

"Ardıcıl-paralel" struktura yaxın səviyyələrdə stansiyalar üçün RBD-dən rəasional istifadə daha məqsədəuyğundur (enerji təchizatı ehtiyatlanması, server infrastrukturunu və rabitə, elementin imtinası funksiyaları birmənalı şəkildə bloklayan ayrı-ayrı texnologiyalar). Lakin, stansiyanın və marşrutlaşdırmanın "yol" hissəsi adətən sadə RBD topologiyasına zəif inteqrasiya olunur. Xidmətin əlçatanlığı alternativ marşrutlardan və qarşılıqlı bloklamadan asılıdır. Buna görə də, qrafik və marşrut yanaşması inkişaf etdirilir. Burada stansiya qrafik kimi modelləşdirilir, xidmət isə qatar marşrutlarının həyata keçirilmə imkanı kimi şərh olunur. Məhz belə "xidmət yönümlü" baxış dinamik imtina ağaclarına əsaslanan qatarların marşrutlaşdırma qabiliyyətinin və əməliyyat riskinin kəmiyyət qiymətləndirilməsi işlərinin əsasını təşkil edir. Burada infrastruktur aktivləri qatar marşrutları ilə əlaqələndirilir və imtinalar zamanı marşrutlaşdırmanın əlçatanlığı qiymətləndirilir.

RBD "altsistem, resurs nə dərəcədə əlçatandır" sualına cavab verməkdə yaxşıdır, lakin stansiya üçün əsas sual "marşrutlaşdırma və əməliyyatların icrası nə dərəcədə əlçatandır" olur ki, bu da aktivləri marşrutlarla açıq şəkildə əlaqələndirən qrafik təsvirləri və modelləri tələb edir.

3.4. Stoxastik dinamik modellər. Markov, yarım Markov, Petri şəbəkələri, Bayes şəbəkələri

Markov modelləri (CTMC-Continuous-Time Markov Chain/DTMC-Discrete-Time Markov Chain) imtina və təmir intensivlikləri nəzərə alınmaqla normal-deqradasiya-imtina-bərpa vəziyyətləri arasındakı keçidləri təsvir etmək üçün istifadə olunur. Dəmiryol işarəverməsində əlçatanlıq göstəricisi tez-tez təhlükəsizliklə yanaşı nəzərə alınır. Stansiyalar üçün Markov modelləri aşağıdakıların qiymətləndirilməsində faydalıdır: kritik altsistemlərin (enerji təchizatı, hesablama sistemləri, ayrı-ayrı işarəvermə və bloklama qurğuları) hazırlıq əmsalı; ehtiyatlama və təmir strategiyalarının səmərəsiz dayanma vaxtına təsiri. Lakin iri stansiyanın ətraflı təsviri zamanı vəziyyət fəzasının ölçü miqyası artır.

Stoxastik Petri Şəbəkələri (SPN-Stochastic Petri Net, GSPN-Generalized Stochastic Petri Net, CPN-Colored Petri Net) paralelliyin, təmir növbələrinin və resurs rəqabətinin vacib olduğu sistemlər üçündür. Dəmiryolu sistemləri üçün stoxastik Petri şəbəkələrinin texniki xidmət və əlçatanlığın modelləşdirməsinə tətbiqi mümkündür. Burada model vasitəsilə etibarlılıq və hazırlıq üçün texniki xidmət üzrə müxtəlif qərarların təsirini qiymətləndirmək mümkündür [2]. Bu, xüsusilə eyni anda bir neçə imtinalar baş verdikdə, təmir işlərinin təşkili kritik olduqda və yalnız bərpa faktını deyil, "bərpa prosesini" modelləşdirmək lazım gəldikdə stansiya üçün uyğundur.

Bayes şəbəkələri (BN-Bayesian Network/DBN-Dynamic Bayesian Network) asılılıqlar, natamam müşahidələr və aprior ekspert bilikləri nəzərə almaq lazım olduqda istifadə olunur. Dəmiryol sistemlərində etibarlılığı və əlçatanlığı qiymətləndirmək üçün dinamik Bayes şəbəkələri üzərində tədqiqatlar mövcuddur (qatarı idarəetmə sistemləri timsalında). Burada DBN qeyri-müəyyənlik və komponentlərin qarşılıqlı əlaqələrini sistemli şəkildə nəzərə almaq üçün istifadə olunur. İmtinalar haqqında məlumatlar natamam yaxud fərqli formatda olduqda (qeydlər, telemetriya və s), imtinaların ümumi səbəbləri vacib olduqda (enerji təchizatı, iqlim təsirləri, proqram təminatının pozulması), statistika və ekspert asılılıqlarını birləşdirmək tələb olunduqda stansiyalar üçün BN/DBN metodundan istifadə olunur [13].

3.5. Məlumatlara əsaslanan modellər: imtinayadək olan zaman paylanması, NHPP, reqressiya, ML

Təmir olunan obyektlər və elementlər səviyyəsində klassik statistik etibarlılıq modelləri tətbiq olunur. Bu modellərdə imtinayadək olan müddət parametrik paylanmalarla (eksponensial, Veybull və s.), təmir edilə bilən sistemlər üçün isə imtina prosesləri ilə təsvir olunur. Terminlərin və əsas modellərin praktik mühəndislik təfsiri üçün çox zaman sorğu təlimatlarından istifadə olunur. Burada təmir edilə bilməyən və təmir edilə bilən obyektlər fərqləndirilir və imtinaların intensivlik funksiyaları müəyyənləşdirilir.

Təmir edilə bilən sistemlər üçün NHPP (Non-Homogeneous Poisson Process) geniş istifadə olunur. O, zamana görə dəyişən imtinalar intensivliyini təsvir edir və təmir edilə bilən obyektlərin imtina axınları üçün model kimi istifadə olunur [14].

Stansiya üçün məlumat əsaslı blok xüsusilə iki səbəbdən vacibdir: o, real şəraitdə (mövsümlilik, yüklənmə, aşınma, texniki xidmət cədvəli) imtinalar intensivliyini və bərpa paylanmalarını "əsaslaşdırmağa" imkan verir; elementlər imtinasını istismar KPI-larına çevirən sistem modelləri (Markov, Petri, simulyasiya) üçün girişə çevrilir.

Reqressiya modelləri və ML (Machine learning) kovariatların qeydiyyatı üçün faydalıdır: qurğunun yaşı, yolaıyıcıının növü, iqlim, manevr intensivliyi və xidmət keyfiyyəti. Onların stansiya işlərindəki məhdudiyyəti zəif "sistem interpretasiyası"dır: hətta dəqiq imtina proqnozu belə şəbəkə, yaxud simulyasiya modelinin əlavə edilməsi olmadan marşrutlaşdırma, gecikmələr və buraxma qabiliyyətinin qiymətləndirilməsini avtomatik olaraq vermir.

3.6. Simulyasiya və Rəqəmsal Əkizlər: DES və Hibrid Yanaşmalar

Əgər təhlilin məqsədi yalnız hazırlıq deyil, həm də istismar nəticələndirsə (gecikmələr, növbələr, buraxma qabiliyyəti, marşrutlar ziddiyyəti), onda birbaşa vasitə diskret hadisə simulyasiyasıdır (DES). DES qatarların hərəkətini, yolların tutulu olmasını, marşrutun hazırlanmasını, əməliyyat vaxtlarını və prioritetləşdirmə qaydalarını modelləşdirir, imtinalar isə infrastrukturun sonradan bərpa edilməklə pisləşməyə səbəb olan hadisələr kimi təqdim olunur. Dəmiryol şəbəkələrinin etibarlılığının və buraxma qabiliyyətinin modelləşdirilməsi üzrə tədqiqatlar "buraxma qabiliyyəti ↔ xidmət etibarlılığı" bağlantısı ilə iri infrastruktur obyektlərinin təhlili üçün simulyasiya tələbi arasında sıx əlaqəni vurğulayır [6]. Əlavə olaraq, cədvəlin icrasının ehtimal simulyasiyasına və qeyri-müəyyənlik təhlilinə əsaslanan yanaşmalar inkişaf etdirilir ki, burada da modelləşdirmə gecikmələrin zamana görə və infrastruktur şəbəkəsi boyunca yayılmasını öyrənməyə imkan verir [15]. Xüsusilə sərnışin və qovşaq stansiyaları üçün qatarların hərəkətinə nəzarətin stansiyanın buraxma qabiliyyətinə təsiri ilə bağlı məsələlərdə DES yanaşması sahə alətləri tərəfindən də dəstəklənir [16].

Hibrid modellər və rəqəmsal əkizlər. Müasir yanaşmada imtina və bərpaların məlumatlara əsasən qiymətləndirməsini (NHPP, reqressiya, ML), asılılıqların formal modellərini (DFT-Dynamic Fault Tree, BN) və texnoloji prosesin simulyasiyasını (DES) hibrid şəkildə birləşdirmək olar. Bu hibrid yanaşma RAM göstəricilərinin və istismar KPI-larının eyni vaxtda hesablanmasına imkan verir. "Forma yönümlü" yanaşmanın tipik bir nümunəsi, infrastruktur aktivlərinin marşrutlaşdırma ilə əlaqələndirildiyi və sonra kəmiyyətə təhlil edildiyi əməliyyat riskinin və qatar marşrutlaşdırmasının qiymətləndirilməsi üçün DFT yanaşmasıdır [5].

Beləliklə, təsnifata görə stansiyanın tapşırığı üçün metodun rəasional "seçim xəritəsi"ni belə təqdim etmək olar:

-kritiklik diaqnostikası və imtinaların əhatə dairəsinin tamlığı → FMEA/FMECA + FTA/ETA (tez və asan başa düşülən) [8];

-təmir və ehtiyatlanma ilə alt sistemlərin hazırlığı → Markov/Petri (bərpa və resursların qeydiyyatı);

-marşrut etibarlılığı və əməliyyat riski → qrafik modellər + DFT/formal marşrut modelləri [5];

-gecikmələr, buraxma qabiliyyəti, ağırlaşma rejimində iş → DES və hibrid sxemlər [16];

-məlumatlara görə kalibrənmə və imtinaların proqnozlaşdırılması → paylanmalar, NHPP (Crow – Army Materiel Systems Analysis Activity), reqressiya, ML sistem səviyyəsinə giriş kimi [12, 14].

4. Dəmiryolu stansiyalarının istismar etibarlılığını qiymətləndirmək üçün metod və modellərin müqayisəli təhlili

4.1. Modellərin müqayisəsi

Stansiyanın istismar etibarlılığı infrastruktur və idarəetmə altsistemlərinin texniki hazırlığı, imtinaların nəticələrini (pisləşmə, gecikmələr, buraxma qabiliyyətinin azalması) və bərpanın (təmir resursları, təşkilati gecikmələr) eyni vaxtda qiymətləndirilməsini tələb edir. Bu baxış, fəaliyyət dövrü ərzində etibarlılıq-hazırlıq-təmirəyararlılığın qarşılıqlı əlaqəsi nəzərə alınan RAMS yanaşması ilə uyğundur. Cədvəl 1-də modellərin müqayisəli təhlili verilmişdir.

Qeyd: BN/DBN çox vaxt stansiya üzrə bir proses modeli kimi deyil "asılılıqlar təbəqəsi" kimi tətbiq olunur. Praktikada onlar imtinalar statistikasını və ya DES ilə birgə tətbiq edilir.

4.2. Stansiya tapşırıqları uyğun metodların tətbiqi

Kritikliyin identifikasiyası və imtinaların aradan qaldırılmasının tamlığı. Əgər tapşırıq stansiyanın bütün imtina rejimlərini (alt sistemlər və funksiyalar üzrə) tez və sistemli şəkildə "əhatə etmək"dirsə, onda FMEA/FMECA + FTA/ETA paketi ən yaxşı balanslı təmin edir. FMEA kataloqlaşdırma və ölçmələri təmin edir, FTA yuxarı hadisələrin səbəblərini rəsmiləşdirir, ETA isə nəticələrin senari əsaslı şaxələndirilməsini təmin edir. Bu, etibarlılıq təhlili praktikasını ilə uyğundur və FMEA, FTA, ETA üzrə IEC standartları tərəfindən yaxşı dəstəklənir [8].

İnfrastruktur altsistemlərinin hazırlıq və səmərəsiz dayanma müddətinin hesablanması. Əgər arxitektura həqiqətən ardıcıl-paralel sistemə yaxındırsa enerji təchizatı, rabitə, server sistemləri kimi altsistemlər üçün RBD struktur sxemləri sürətli və interpretasiya edilə bilən bir həll təqdim edir [11]. Pisləşmə və təmir işləri nəzərə alındıqda, *Markov modelləri* daha effektivdir ki, bu da işarəvermə sistemlərinin ölçətanlığının qiymətləndirilməsi praktikasını ilə təsdiqlənir [17]. Sorğu növbələrinin qeydiyyatı, briqadaların məhdud sayı və resurslar uğrunda rəqabəti nəzərə almaq üçün *rəngli Petri şəbəkələri* daha adekvatdır [2].

Marşrutlaşdırma və xidmət etibarlılığı. Stansiya obyekt kimi marşrut itkilərinə xüsusilə həssasdır. Buna görə də, aktivlər və qatar yollarını (marşrutları) birbaşa əlaqələndirən modellər (məsələn, marşrutlaşdırma və əməliyyat riskini qiymətləndirmə üçün DFT yanaşmaları) stansiya üçün ən obyektiv çıxış təmin edir [5].

İmtinaların gecikmələrə və buraxma qabiliyyətinə təsiri. Əgər "bu imtina profili ilə neçə dəqiqə itirəcəyik" sualına cavab verməliyəksə, onda baza RAM göstəriciləri kifayət deyil. Bizə proses təbəqəsi lazımdır. Burada birbaşa alət DES simulyasiyasıdır. O, ağırlaşmış rejimlərdə gecikmələri, növbələri və marşrut ziddiyyətlərini müşahidə etməyə imkan verir. Diskret hadisə modelləşdirməsini və layihələndirmədə buraxma qabiliyyətinin təhlili üçün formal yaxud optimallaşdırma metodlarını birləşdirmə praktikasını DES-in tətbiq dəyərini təsdiqləyir [19].

Verilənlərə görə modellərin kalibrənməsi və parametrlərin reallığı. "Sistem" modelinin seçilməsindən asılı olmayaraq, parametrləşdirmə imtina yaxud təmir statistikasına əsaslanmalıdır. NIST-National Institute of Standards and Technology, SEMATECH-Semiconductor Manufacturing Technology təmir edilə bilən və bilinməyən obyektlərdə paylanmaların və modellərin seçilməsi

üçün əsas alətlər dəsti təqdim edir [18]. Təmir edilə bilən obyektlər və imtina axınları üçün NHPP modelləri faydalıdır. Bura təmir edilə bilən sistemlərin etibarlılıq mühəndisliyində geniş istifadə olunan Crow-AMSAA (power-law NHPP) da daxil etmək olar [14]. Ayrıca qeyd etmək lazımdır ki, infrastrukturda əlçatanlığın interpretasiyası yarımdaimi istismar və məlumatların keyfiyyəti səbəbindən əhəmiyyətsiz deyil, bu istənilən modelin giriş və çıxışlarının düzgünlüyünə təsir göstərir [20].

4.3. Modellərin tətbiqində tipik səhvlər

“Stansiya etibarlılığı”-ni “avadanlıq etibarlılığı” ilə əvəz etmək. Ən çox yayılmış səhvlərdən biri, kritik elementlərin MTBF/MTTR qiymətləri ilə “stansiyanın hazırlığını” təsdiq etməkdir. Bu, topologiya və marşrutları nəzərə almadan sistemli sürüşmə yaradır. Eyni imtina (məsələn, yolayırıcı) alternativ marşrutların və boğazcıqdakı ziddiyyətlərin mövcudluğundan asılı olaraq kökündən fərqli təsirlərə səbəb ola bilər. Marşrutlaşdırma qabiliyyətini və buraxma (yaxud emal) xidmətini qiymətləndirən yanaşmalar birbaşa bu boşluğu aradan qaldırmağa yönəlmişdir [5].

Yaşlanma və mövsümiyyətin mövcudluğu zamanı eksponensial defolt fərziyyəsi ($\lambda = \text{const}$). Markov modellərində və RBD-lərdə imtina və bərpayadək çox vaxt standart olaraq eksponensial müddətlər istifadə olunur. Stansiyanın istismar məlumatları üçün aşınma, hava amilləri, qaydalar səbəbindən bu doğru olmaya bilər. Praktiki düzgünlük üçün aşağıdakıları etmək vacibdir: paylanmaları yoxlamaq; təmir edilə bilən sistemlər üçün qeyri-parametrik, Veybull yanaşmalarından və ya NHPP-dən istifadə etmək; kovariatları tətbiq etmək [18].

Təmir resurslarına və təşkilati gecikmələrə məhəl qoymamaq. Hətta “kağız üzərində” eyni MTTR-də faktiki səmərəsiz dayanma müddəti növbələr, briqadaların əlçatanlığı, “texnoloji pəncərə”lər və logistika ilə müəyyən edilir. Bu, dayanma vaxtının paylanmasının əlavələrinin nəzərə alınmamasına və nəticədə gecikmələrin düzgün qiymətləndirilməməsinə gətirib çıxarır. Petri şəbəkələri və DES resurs məhdudiyyətlərinin açıq şəkildə modelləşdirilməsinə imkan verir [2].

İmtinaların və funksional asılılıqların ümumi səbəblərinin qiymətləndirilməməsi. Stansiya imtinaları çox vaxt enerji təchizatı, rabitə, proqram təminatı vasitəsilə əlaqələndirilir; asılılıqları nəzərə almadan FTA/RBD-də ehtimalların “müstəqil” şəkildə hesablanması etibarlılığın qiymətini süni artırır. Bu məqsədlə funksional asılılıqlar (genişləndirilmiş sxemlərdə), BN/DBN, eləcə də DFT-də dinamik konstruksiya istifadə olunur [11].

İnfrastruktur üçün göstəriciləri qarışdırmaq və “əlçatanlığı” səhv təyin etmək. İnfrastrukturda əlçatanlıq hərəkət intensivliyindən və texnoloji məhdudiyyətlərdən asılıdır. “Əlçatanlıq müddəti”nin məxrəcini səhv müəyyən etmək stansiyalar, periodlar müqayisə edilərkən mübahisəli nəticələrə gətirib çıxarır. Dəmiryol infrastrukturunda əməliyyat əlçatanlığının ölçülməsinə həsr olunan tədqiqatlar bunu təsdiq edir [20].

Müqayisəli təhlil göstərir ki, stansiya üçün universal “vahid” model yoxdur və ən çox təkrarlana bilən elmi və praktik sxem hibrid sxemdir.

Cədvəl 1

Modellərin müqayisə cədvəli

Metodlar	Modelləşdirmə (səviyyə)	Əsas çıxışlar	İlkin məlumatlar	Bərpa, təmir resursları	Marşrutlaşdırma, topologiya	Asılılıqlar, ümumi səbəblər	Miqyashlıq	Təfsir
FMEA, FMECA	Element və qovşaq imtinaları və sonrakı nəticələr (element → funksiya)	İmtinalar siyahısı, kritiklik, tədbirlər	Ekspert qiymətləri + imtina jurnalları	Dolay (tədbirlər vasitəsilə), adətən dinamikasız	Adətən yoxdur (Əgər xüsusi olaraq əlavə edilmirsə)	Hissəvi (səbəb kimi), ciddi ehtimal strukturu olmadan	Orta (iri stansiyalarda böyük iş həcmi)	Yüksək [8]
FTA	Yuxarı səviyyə hadisə səbəbinin məntiqi strukturu	Yuxarı səviyyə hadisənin baş vermə tezliyi, minimal en kəsiklər	Əsas hadisələr etibarlılığı + ağacın strukturu	Baza şəklində məhduddur (dinamiki deyil)	Dolay yolla	Məhdudlaşdırılmış (xüsusi konstruksiya tələb edir)	Orta (detallar artdıqca mürəkkəbləşmə)	Yüksək [9]
ETA	Başlanğıc hadisədən sonra nəticələrin şaxələnməsi (senarilər)	Senarilərin ehtimalı, risk-göstəricilər	Başlanğıc hadisələrin tezliyi+ maneələrin ehtimalı	Hissəvi (uğurlu/ uğursuz bərpa şəklində şaxələr)	Adətən yoxdur, lakin rejim keçidini nəzərə ala bilər	Hissəvi	Orta	Orta - yüksək [10]
RBD	Altsistemlərin struktur hazırlığı (ardıcıl-paralel)	Etibarlıq, hazırlıq	MTBF/ MTTR və ya bloklar üçün paylama	Bəli (MTTR üzrə), lakin növbəli ziddiyyətlər olmadan	Yol topologiyası üçün zəifdir, elektrik təchizatı üçün yaxşıdır	Zəifdir (funksional asılılıqlar üçün sazlanmalıdır)	Altsistemlərdə yüksəkdir, tam stansiya üçün pisdir	Yüksək [11]
Markov modelləri (CTMC/ DTMC)	"Norma-pisləşmə - imtina-təmir" vəziyyəti (altsistem / funksiya)	Əlçatanlıq, vəziyyətlər ehtimalı	İmtinaların, təmirin intensivliyi, vəziyyətlərin strukturu	Bəli, lakin təmir resursları çox zaman sadələşdirilir	Mümkün, lakin vəziyyətlərə marşrutların abstraksiyasını tələb edir	Mümkündür, lakin modeli mürəkkəbləşdirir	Aşağı-orta	Orta [17]

Stoxastik rəngli Petri şəbəkələri (SPN/ CPN)	Paralellik, növbələr, təmir resursları (proseslər)	Əlçatanlıq + bərpa prosesinin göstəriciləri	İmtinalar və təmirlər üzrə məlumatlar + xidmət qaydaları və resurslar	Güclü tərəfi (növbələr, resurslara görə rəqabət)	Marşrutlarla əlaqələndirmək olar, lakin məntiqi modelləşdirmə tələb edir	Yaxşı (asılılıqlar, sinxronlaşdır- malar)	Orta (modelin mürəkkəb- liyi artır)	Orta [2]
Bayes şəbəkələri (BN/ DBN)	Ehtimal asılılıqları və qeyri- müəyyənlik (sistem/ funksiya)	İmtinaların/ vəziyyətlərin aposterior ehtimalları, səbəblərin diaqnostikası	Müşahidələr + aprior asılılıqlar; natamam məlumatlarla mümkündür	DBN-də bəli; təmir resursları adətən modeldə deyil	Dolayı (əgər qovşaqlar marşrutlar, yaxud xidmət deyilsə)	Güclü tərəflər (ümumi səbəblər, korrelyasiya-lar)	Orta	Orta
DFT / marşrut- laşdırma üçün formal xəta ağacı yanaşmaları	İmtinaların dinamikası + marşrutların xidmət əlçatanlığı	Marşrutlaşdır-ma, “xidmət etibarlılığı”, əməliyyat riski	Aktivlər xəritəsi → marşrutlar + İmtina/ Təmir parametrləri	Bəli (dinamik elementlər), lakin təmir resursları adətən daha sadədir	Güclü tərəfləri (marşrutların birbaşa qiymətləndir- məsi)	Funksional asılılıqları nəzərə ala bilər	Orta (qurul-manın avtomatlaş- dırılmasın- dan asılıdır)	Orta- yüksək [5]
Etibarlılığın statistikası (paylamalar, NHPP/ C row AMSAA)	Elementlərin imtinası/bərpası prosesləri	$\lambda(t)$, MTBF/ MTTR parametrləri, trendlər, artım/ pisləşmə	İmtinalar/ təmirlərin tarixi məlumatları	Dolayı (təmir modeli ilə)	Xeyr (sistem təbəqəsi olmadan)	Hissəvi (kovariat/seq- mentləmə ilə)	Yüksək	Orta [18]
DES Simulyasiya (diskret-hadisə)	Stansiyanın texnoloji prosesi + imtina hadisələri	Gecikmələr, buraxma qabiliyyəti, növbə və pis- ləşmələrdə KPI	Cədvəl, idarə- etmə qaydaları, texnoloji müddətlər + imtina və təmir	Bəli (təmir resurslarını və prioritetləri modelləşdirmək mümkündür)	Güclü tərəfləri (açıq-aydın topologiya və marşrutların ziddiyyəti)	Bəli (imtina senariləri və mexanizmləri vasitəsilə)	Orta (detallaşdır- madan asılıdır)	Orta (yoxlama lazımdır) [19]

Nəticə. Dəmiryol stansiyalarının istismar etibarlılığını qiymətləndirmək üçün mövcud metod və modellərin ətraflı təhlili zamanı məlum olmuşdur ki, ayrı-ayrı texniki vasitələrin ənənəvi etibarlılıq göstəriciləri (MTBF, MTTR, hazırlıq əmsalı) stansiya imtinalarının istismar nəticələrini tam təsvir etmir. Belə ki, əksər nasazlıqlar stansiyanın işləmə qabiliyyətinin tamamilə itirilməsinə deyil, texnoloji prosesin pisləşməsinə səbəb olur.

Keyfiyyət və səbəb-nəticə metodları (FMEA, FMECA, FTA, ETA) kritik nasazlıqlar və pisləşmə senarilərini müəyyən etmək üçün effektiv vasitələrdir, lakin kəmiyyət dinamik modelləri ilə tamamlanma tələb edir. Stoxastik metodlar (Markov modelləri, Petri və Bayes şəbəkələri) bərpa, pisləşmiş rejimlər və asılılıqları nəzərə alır, lakin onların tətbiqi iri stansiyaların modelləşdirilməsində artan mürəkkəbliyə və məhdudlaşır. Diskret hadisə simulyasiyası imtinaların gecikmələrə, buraxma qabiliyyətinə və stansiyanın sabitliyinə təsirini qiymətləndirmək üçün ən uyğun vasitədir.

Dəmiryol stansiyalarının istismar etibarlılığını düzgün qiymətləndirmək üçün imtina məlumatlarının statistik emalını, altsistemlərin əlçatanlıq modellərini və texnoloji prosesin simulyasiyasını birləşdirən hibrid yanaşmanın tətbiqi daha məqsədəuyğundur. Bu yanaşma texniki etibarlılıq xüsusiyyətlərini istismar göstəriciləri ilə əlaqələndirməyə imkan verir, etibarlılığın idarə edilməsi və dəmiryolu stansiyalarının inkişafı ilə bağlı əsaslandırılmış qərarları dəstəkləyir.

REFERENCES

1. Technical report. IEC TR 62278-4: 2016 - Railway applications - Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) - Part 4: RAM risk and RAM life cycle aspects. https://cdn.standards.iteh.ai/samples/23604/e1fe5507aba94572864f1794fe00b5-d1/IEC-TR-62278-4-2016.pdf?utm_source
2. Song H., Schnieder E. Modeling of railway system maintenance and availability by means of Colored Petri nets // *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2018, 20(2): 236–243. <https://doi.org/10.17531/ein.2018.2.08>
3. Morant Amparo, Gustafson Anna, Söderholm Peter. Safety and Availability Evaluation of Railway Signalling Systems// *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016 (01), 303-316. DOI:10.1007/978-3-319-23597-4_22.
4. Bemment S. D., Goodall R. M., Dixon R., Ward, C. P. Improving the reliability and availability of railway track switching by analysing historical failure data and introducing functionally redundant subsystems//*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F, Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 232, 5 (2018): 1407-1424. doi:10.1177/0954409717727879
5. Weik N., Volk M., Katoen JP. DFT modeling approach for operational risk assessment of railway infrastructure// *Int J Softw Tools Technol Transfer* 24, 331–350 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10009-022-00652-4>
6. Giorgio Medeossi, Aurelio Marchionna, Giovanni Longo. Capacity and reliability on railway networks: a simulative approach//University of Trieste, Administrative Office of the Doctoral Program, 22nd cycle of the doctoral school. https://scispace.com/pdf/capacity-and-reliability-on-railway-networks-a-simulative-34p4ztntrr.pdf?utm_source
7. N. Weik, N. Nießen. Performability Analysis of Railway Systems// 2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), Singapore 2018, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018.8641589>
8. IEC 60812: 2018 Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). -

- https://webstore.iec.ch/en/publication/26359?utm_source
9. IEC 61025: 2006 Fault tree analysis (FTA). https://webstore.iec.ch/en/publication-/4311?utm_source
 10. IEC 62502: 2010 Analysis techniques for dependability - Event tree analysis (ETA). https://webstore.iec.ch/en/publication/7131?utm_source
 11. IEC 61078: 2016 Reliability block diagrams. https://webstore.iec.ch/en/publication-/25647?utm_source
 12. Manafov E.K. The use of a fuzzy expert system to increase the reliability of diagnostics of axle boxes of rolling stocks// Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. Poland 2020, Volume 107, p. 95-106. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2020.107.7>.
 13. Lei Jiang, Xiaomin Wang, Yiliu Liu. Reliability evaluation of the Chinese Train Control System level 3 using a fuzzy approach//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F, journal of rail and rapid transit, 2018, 232 (9), 2244-2259. <https://doi.org/10.1177/0954409718769193>
 14. Jozef Van Dyck, Tim Verdonck. Precision of power-law NHPP estimates for multiple systems with known failure rate scaling//Reliability Engineering & System Safety, 2014, Vol 126, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.01.019>
 15. Rebecca Haehn, Erika Ábrahám, Nils Nießen. Probabilistic Simulation of a Railway Timetable// 20th Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems. 2020, Article No. 16; pp. 16:1–16:14. https://publications.rwth-aachen.de/record/807139/files/807139.pdf?utm_source
 16. Adrian Wagner. Influence of train and traffic control on railway station capacity//Doctoral thesis, TU Wien https://www.opentrack.ch/opentrack/downloads/TUWien.Wagner.PhDThesis.2024.pdf?utm_source
 17. Koji IWATA, Shigeto HIRAGURI, Ikuo WATANABE. Evaluation Methods for Railway Signalling Systems from the Viewpoint of Availability// Quarterly Report of RTRI, 2009, 50 (3), 152-157, <https://doi.org/10.2219/rtriqr.50.152>
 18. https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/?utm_source
 19. Luteberget, B., Claessen, K., Johansen, C. et al. SAT modulo discrete event simulation applied to railway design capacity analysis. Form Methods Syst Des 57, 211–245 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10703-021-00368-2>
 20. Stenström C, Parida A, Kumar U. Measuring and monitoring operational availability of rail infrastructure. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2016;230(5):1457-1468. doi:10.1177/0954409715592189

ANALYSIS OF EXISTING METHODS AND MODELS FOR ASSESSING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF RAILWAY STATIONS

Manafov E.K.

National Aviation Academy

This article provides a detailed analysis of existing methods and models for assessing the operational reliability of railway stations as complex socio-technical systems in which the technical condition of the infrastructure is directly linked to the quality of the transportation process. It is shown that the traditional understanding of reliability as the reliability of individual devices is insufficient for stations, as most failures do not result in a complete shutdown of operations, but rather in a transition to degraded modes, accompanied by the loss of routes, reduced throughput, increased delays, and increased operational risks. Based on this, the concept of station operational reliability is clarified as the ability to maintain the required level of operation during failures, restoration, and changes in operating conditions.

The main classes of methods used in this area are systematized: qualitative methods of failure analysis, cause-and-effect models, structural reliability diagrams, Markov and semi-Markov models, stochastic Petri nets, Bayesian networks, statistical and data-driven approaches, and discrete-event simulation modeling. A comparative analysis was conducted based on station applicability criteria, required data, and the ability to account for recovery, route structure, degraded modes, and operational performance. It was determined that none of the approaches considered alone provides a complete and adequate assessment of station operational reliability.

A conclusion is substantiated regarding the feasibility of a hybrid architecture combining statistical assessment of failures and recovery, modeling of subsystem availability and route reliability, and simulation of the station's process flow. Practical recommendations are offered for the selection of methods, the structure of initial data, model validation, and the implementation of results in operational activities.

Keywords: operational reliability, railway station, refusal, restoration, RAMS, degraded modes, throughput, simulation modeling.

Müəllif haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Manafov Elşən Kamil oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	“Energetika və avtomatika” kafedrasının müdiri, t.f.d., dosent	emanafov@naa.edu.az mob: (+994) 55 741-79-39

UDC: 004.832

DOI: 10.30546/EMNAA.2026.02.28.156

EXTENSION OF FUZZY IMPLICATIONS TO Z-IMPLICATION

Ahmadov Sh.A.

Azerbaijan State Oil and Industry University

The effectiveness of any management process in technical, organizational and other systems depends on the quality of the decisions used. Decisions are more useful if they are made on the basis of reliable information. The description of the reliability of information is not always possible within the framework of strict mathematical regularities, because it is based on perception, expressed by words. Considering that information processing in computers is based on binary logic, it turns out that there are numerous problems in this area. There are numerous approaches to information processing based on probability theory, fuzzy logic, and Zadeh's latest theory- Z-number theory. Zadeh introduced the concept of fuzzy implication in 1965, Atanassov introduced the concept of intuitionistic fuzzy implication in 1983, Torra introduced the concept of hesitant fuzzy implication in 2010, Przemyslaw Grzegorzewski introduced the concept of new probabilistic implication in 2011, and Zadeh introduced the concept of Z-number theory into science. Thus, fundamental knowledge was accumulated for the development of new approaches in this field. Based on the analytical analysis, it can be noted that the solution to the information processing problem by using probability and fuzzy implications together can be solved with a new approach based on Z-number theory. It was this idea that gave impetus to the formation of the new Z-implication (in 2025) and the creation of the Z-conditional reasoning algorithm based on it. In this work, we will prove that 3 fuzzy implications- Fodor, Gödel, Rescher implications are probabilistic implications. This also proves that these implications are Z-implications.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy implication, Fodor, Gödel, Rescher implications, probabilistic implication, copula, Z-implication, information processing

Introduction. In an era of rapid development of artificial intelligence, new technologies for decision-making and new means of information processing are used as supporting tools in decision-making. Most of the information used when making decisions is uncertain, and people have strong decision-making abilities. It is difficult to express this process algorithmically or in words. The solution of this problem is related to the development of new approaches to the representation and processing of information.

Implications are considered the most effective tool in modeling uncertain reasoning during verbal description of information. On the other hand, implications are used in reasoning problems. Thus, based on the review of works on implications, we can note that implications have been a field of interest to analysts for a century. Thus, binary, fuzzy, intuitionistic, hesitant fuzzy implications, and probabilistic implications have been created by a number of scientists (Zadeh, Atanassov, Torra) and are being successfully applied in different areas.

Implications were first used in medicine in the 1980s. The results of research by Bandler Kohout, De Baets and Kerre [1-3] form the basis of today's auto diagnostic systems. A number of works on the analysis and improvement of fuzzy implications and fuzzy relations based on them have been published in the last decade [4-7]. In [8] copulas and implications were considered together and a new approach to the improvement of implication was proposed. In [9] the issue of

aggregation of implications was considered. In [10], a new family of (A,N) implication functions is introduced. In [11] new characteristics of (S,N) fuzzy implications are discussed. In [12] (T,N) implications are studied. In [13] the properties of 9 implications widely used in fuzzy set theory are analyzed.

In accordance with the increase in the level of uncertainty, the classical binary implications were expanded and named intuitionistic fuzzy implication, fuzzy implication and hesitant fuzzy implication. Fuzzy implications form the basis of fuzzy logical inference. Fuzzy implications are used in various fields. Lukasiewicz implication is widely used in the field of decision making. Thus, this implication has been widely studied in geometrical reasoning problems.

As we know, logical inference based on implications is carried out by expressing the rule base in the form of relation matrices, using aggregation operators, and applying the composition rule. The established implications are probabilistic or fuzzy in nature, but in the scientific literature there is a need to analyze implications that combine the properties of both probabilistic and fuzzy implications. This need arises from the need to formalize the Z-relation matrix. The first work in this area was given by Latha and Velammal in 2023 [14]. However, this article did not consider the processing of Z-information. Our research in the last three years has been focused on this area. For the first time, we have proposed Z-implication and a logical inference algorithm based on it. In this work, we will look at the process of several fuzzy implications satisfying the properties of Z-implication.

Purpose of the work The aim of the work is to check whether the implications widely used in logical deduction and reasoning - Gödel, Fodor, Rescher satisfy the properties of probabilistic implications and to determine the possibility of their use in the Z-reasoning algorithm proposed by us.

The formulas of the implications that we will use to achieve this goal are given below [13]:

$$\text{Rescher: } I = \begin{cases} 1, & \text{if } a \leq b \\ 0, & \text{if } a > b \end{cases}$$

$$\text{Fodor: } I = \begin{cases} 1, & \text{if } a \leq b \\ \max(1 - a, b), & \text{if } a > b \end{cases}$$

$$\text{Gödel: } I = \begin{cases} 1, & \text{if } a \leq b \\ b, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Let's check whether these fuzzy implications satisfy the properties of probabilistic implications.

For this purpose, we use the following definitions.

Definition 1[15]. A copula (specifically a 2-copula) is a function $C: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ which satisfies the following conditions:

- (a) $C(a,0) = C(0,b) = 0$ for every $a,b \in [0,1]$,
- (b) $C(a,1) = a$ for every $a \in [0,1]$,
- (c) $C(1,b) = b$ for every $b \in [0,1]$,
- (d) for every $a_1, a_2, b_1, b_2 \in [0,1]$ such that $a_1 \leq a_2$ and $b_1 \leq b_2$
 $C(a_2, b_2) - C(a_2, b_1) - C(a_1, b_2) + C(a_1, b_1) \geq 0$.

For any copula C and for all $a,b \in [0,1]$ $W(a,b) \leq C(a,b) \leq M(a,b)$, where $W(a,b) = \max\{a+b-1, 0\}$, $M(a,b) = \min\{a,b\}$ are also copulas.

Definition 2[15]. A function $IC : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ given by $IC(a,b) = 1$ if $a=0$, $C(a,b)/a$, if $a>0$, where C is a copula, is called a probabilistic implication.

Definition 3[15]. A probabilistic implication $I_c : [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ defined by Def. 2 satisfies the following conditions:

$$I(0,0)=1;$$

$$I(1,1)=1;$$

$$I(1,0)=0;$$

$$\text{IF } b_1 \leq b_2 \text{ THEN } I(a,b_1) \leq I(a,b_2)$$

Statement of the problem. Goal of the problem is to check whether the Resche, Fodor and Gödel implications satisfy the properties of the probability implication on the examples. For this purpose, let us use one of the rule bases given in [16].

For example, a rule is defined:

If the error e is [large negative (LN), highly certain],
then the control action u is [large negative (LN), highly certain]
where highly certain = $0.3/0.8 + 1/0.85 + 0.2/0.9$.

$$\begin{aligned} e &= (\text{Large negative, highly certain}) = (1.00/-10 + 0.73/-7 + 0.34/-3 + 0.20/0 + 0.13/3 + 0.08/7 + 0.06/10, = 0.3/0.8 + 1/0.85 + 0.2/0.9) \\ u &= (\text{Large negative, highly certain}) = (1.00/-1 + 0.92/-0.7 + 0.67/-0.3 + 0.50/0 + 0.37/0.3 + 0.26/0.7 + 0.20/1, = 0.3/0.8 + 1/0.85 + 0.2/0.9) \end{aligned}$$

To check whether the Rescher implication satisfies the properties of the probability implication, let us find the distributions on the points of the given rule (consequent part of the rule and points of B on $Z(A,B)$). For this purpose, we will use the goal programming method.

Goal programming problem was formulated and used solved to calculate the probabilistic distributions.

$$\text{Objective function: } p = \sum_{i=1}^7 \mu_i p_i$$

$$\frac{\sum_{i=1}^7 \mu_i x_i}{\sum_{i=1}^7 \mu_i} = \sum_{i=1}^7 x_i p_i \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^7 p_i = 1 \quad (2)$$

where $p_i \geq 0$, and points of obtained probability, x_i -universe points of A part of $Z(A,B)$ number, μ_i -is membership degree on universe points on A , i - number of rules.

Obtained probability distributions using goal programming method are as follows (table 1-2):

Table 1

Distributions over input						
Probability distributions				Cumulative probabilities		
X=0.8	X=0.85	X=0.9		X=0.8	X=0.85	X=0.9
0	0	0		0	0	0
0,133333	0,07564	0,017949		0,133333	0,07564	0,017949
0,490891	0,567815	0,69423		0,624224	0,643455	0,712179
0,309885	0,348348	0,287823		0,934109	0,991803	1,000002
0,065891	0,008197	-1E-06		1	1	1,000001
0	0	0		1	1	1,000001
0	0	0		1	1	1,000001

Table 2

Probability distributions over output						
Probability distributions				Cumulative probabilities		
x=0.8	x=0.85	x=0.9		X=0.8	X=0.85	X=0.9
0,052445	0	0		0,052445	0	0
0,175625	0,164606	0,046413		0,22807	0,164606	0,046413
0,25312	0,313403	0,448053		0,48119	0,478009	0,494466
0,229064	0,276772	0,364077		0,710254	0,754781	0,858543
0,189929	0,217191	0,141458		0,900183	0,971972	1,000001
0,099817	0,028028	-1E-06		1	1	1
0	0	0		1	1	1

Where 0.8: (0,0.133333, 0.490891, 0.309885,0,065891,0,0);
0.8: (0.052445; 0.175625; 0.25312;0.229064;0.189929; 0.099817;0).

The cumulative probability distributions of the obtained probability distributions are given below:

0.8: (0,0.133333, 0.624224, 0.934109,1,1,1);
0.8: (0.052445; 0.22807; 0.48119;0.710254;0.900183; 1;1).

Numerical example for checking properties of probabilistic implication on RESCHER fuzzy implication.

Graphical representation of Rescher implication is represented in Figure 1

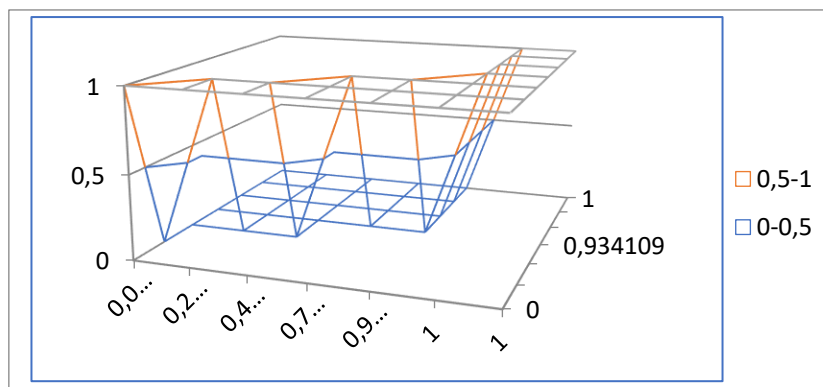


Figure 1. Graphical representation of Rescher implication

The created matrix using cumulative probabilities on input and output of the rule described as follow:

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0,052445 & 0,22807 & 0,48119 & 0,710254 & 0,900183 & 1 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 0,133333 \\ 0,624224 \\ 0,934109 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right] \end{matrix}$$

First column of the matrix is defined as follow:

IF $a_1 < b_1$, THEN $I(a_1, b_1) = 1$ or $0 < 0.052445$, $I(0, 0.052445) = 1$;
 IF $a_2 > b_1$, THEN $I(a_2, b_1) = 0$ or $0.133333 > 0.052445$, $I(0.133333, 0.052445) = 0$;
 IF $a_3 > b_1$, THEN $I(a_3, b_1) = 0$ or $0.624224 > 0.052445$, $I(0.624224, 0.052445) = 0$;
 IF $a_4 > b_1$, THEN $I(a_4, b_1) = 0$ or $0.934109 > 0.052445$, $I(0.934109, 0.052445) = 0$;
 IF $a_5 > b_1$, THEN $I(a_5, b_1) = 0$ or $1 > 0.052445$, $I(1, 0.052445) = 0$;
 IF $a_6 > b_1$, THEN $I(a_6, b_1) = 0$ or $1 > 0.052445$, $I(1, 0.052445) = 0$;
 IF $a_7 > b_1$, THEN $I(a_7, b_1) = 0$ or $1 > 0.052445$, $I(1, 0.052445) = 0$.

Let $a=0$ and $b=0$. Using Rescher implication

$$I = \begin{cases} 1, & \text{if } a \leq b \\ 0, & \text{if } a > b \end{cases}$$

We define this points also satisfies the properties of probabilistic implication:

$$\begin{aligned} I(0,0) &= 1; \\ I(1,1) &= 1 \text{ (see cumulative probability matrix);} \\ I(1,0) &= 0. \end{aligned}$$

Or

If $a=0$ and $b=0$ then $I(0,0)=1$. That is, when both a and b are zero, the properties of the probabilistic implication are satisfied, because the antecedent (first part) is not greater than the consequent (second part).

if $a=1$ and $b=1$ then $I(1,1)=1$, if $a=1$ and $b=0$ then $I(1,0)=0$.

IF $b_1 \leq b_2$ THEN $I(a, b_1) \leq I(a, b_2)$ (see matrix $0,052445 \leq 0,22807$ then $1 \leq 1$, $0 \leq 1$, $0 \leq 0$) satifiers.

The above analysis proves that the implication of Rescher's fuzzy implication satisfies the properties of a probabilistic implication.

Numerical example for checking properties of probabilistic implication on Fodor fuzzy implication. Graphical representation of Fodor implication is represented in Figure 2.

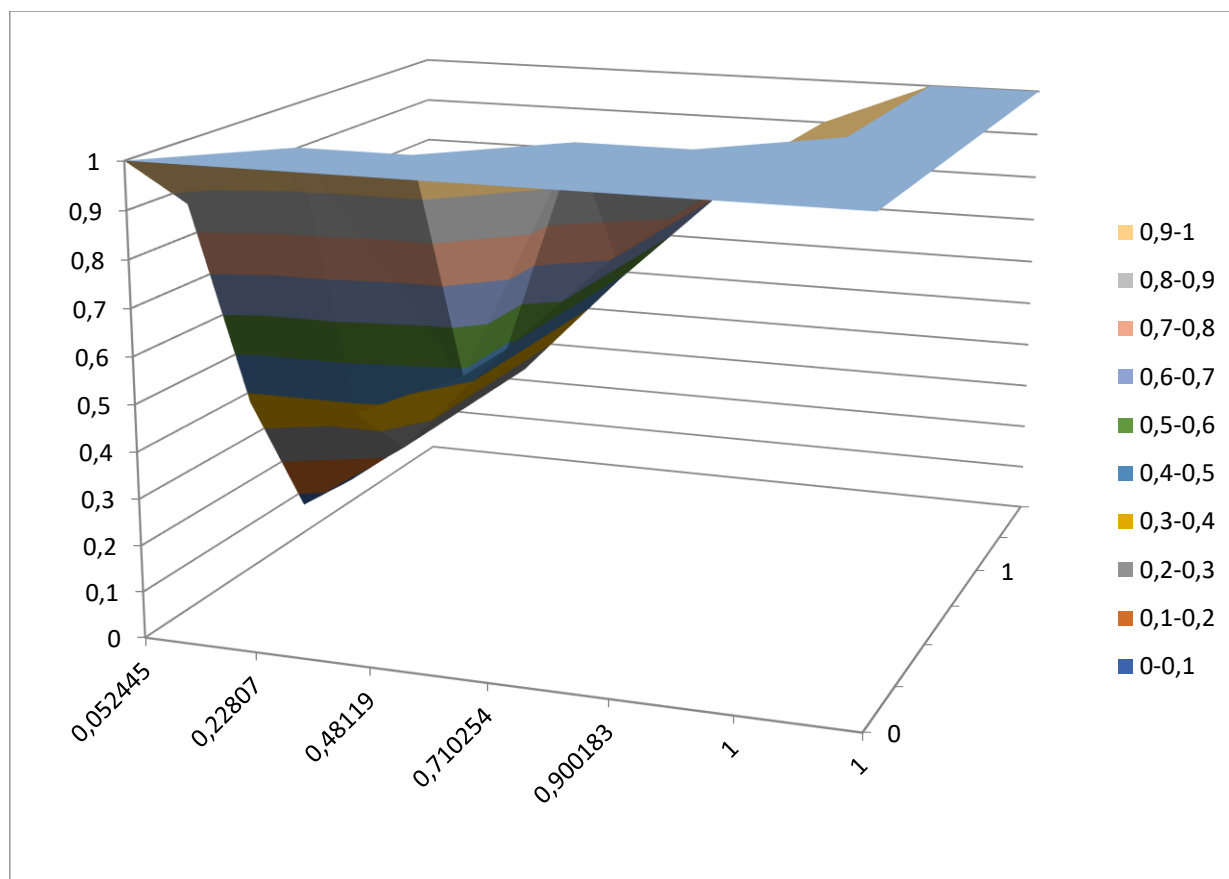


Figure 2. Graphical representation of Fodor implication

The created matrix using cumulative probabilities on input and output of the rule described as follow:

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0,052445 & 0,22807 & 0,48119 & 0,710254 & 0,900183 & 1 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 0,133333 \\ 0,624224 \\ 0,934109 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,866667 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,375776 & 0,375776 & 0,48119 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,065891 & 0,22807 & 0,48119 & 0,710254 & 0,900183 & 1 & 1 \\ 0,052445 & 0,22807 & 0,48119 & 0,710254 & 0,900183 & 1 & 1 \\ 0,052445 & 0,22807 & 0,48119 & 0,710254 & 0,900183 & 1 & 1 \\ 0,052445 & 0,22807 & 0,48119 & 0,710254 & 0,900183 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

First column of the matrix is defined using Fodor implication $I = \begin{cases} 1, & \text{if } a \leq b \\ \max(1 - a, b), & \text{if } a > b \end{cases}$ as follow:

IF $a_1 < b_1$, THEN $I(a_1, b_1) = 1$ or $0 < 0.052445$, $I(0, 0.052445) = 1$;
 IF $a_2 > b_1$, THEN $I(a_2, b_1) = 0.866667$ or $0.13333 > 0.052445$, $I(0.13333, 0.052445) = 0.866667$;
 IF $a_3 > b_1$, THEN $I(a_3, b_1) = 0.375776$ or $0.624224 > 0.052445$, $I(0.624224, 0.052445) = 0.375776$;
 IF $a_4 > b_1$, THEN $I(a_4, b_1) = 0.065891$ or $0.934109 > 0.052445$, $I(0.934109, 0.052445) = 0.065891$;
 IF $a_5 > b_1$, THEN $I(a_5, b_1) = 0.052445$ or $1 > 0.052445$, $I(1, 0.052445) = 0.052445$;
 IF $a_6 > b_1$, THEN $I(a_6, b_1) = 0.052445$ or $1 > 0.052445$, $I(1, 0.052445) = 0.052445$;
 IF $a_7 > b_1$, THEN $I(a_7, b_1) = 0.052445$ or $1 > 0.052445$, $I(1, 0.052445) = 0.052445$.

Let $a=0$ and $b=0$, then properties of probabilistic implication is satisfied.

This points also satisfies the properties of probabilistic implication:

$I(0, 0) = 1$;

$I(1, 1) = 1$ (see cumulative probability matrix);

$I(1, 0) = 0$.

Or

If $a=0$ and $b=0$ then $I(0, 0) = 1$. if $a=1$ and $b=1$ then $I(1, 1) = 1$, if $a=1$ and $b=0$ then $I(1, 0) = 0$.

IF $b_1 \leq b_2$ THEN $I(a, b_1) \leq I(a, b_2)$ (see matrix if $0.22807 \leq 0.48119$ then $1 \leq 1$, $0.375776 < 0.48119$, $0.22807 < 0.48119$) satifiers.

The above given analysis proves that the implication of Fodor's fuzzy implication satisfies the properties of a probabilistic implication.

Numerical example for checking properties of probabilistic implication on Gödel's

fuzzy implication $I = \begin{cases} 1, & \text{if } a \leq b \\ b, & \text{otherwise} \end{cases}$.

Graphical representation of Gödel's implication is represented in Figure 3.

The created matrix using cumulative probabilities on input and output of the rule described as follow:

		0.052445	0.22807	0.48119	0.710254	0.900183	1	1
	0	1	1	1	1	1	1	1
	0.133333	0.052445	1	1	1	1	1	1
	0.624224	0.052445	0.22807	0.48119	1	1	1	1
R=	0.934109	0.052445	0.22807	0.48119	0.710254	0.900183	1	1
	1	0.052445	0.22807	0.48119	0.710254	0.900183	1	1
	1	0.052445	0.22807	0.48119	0.710254	0.900183	1	1
	1	0.052445	0.22807	0.48119	0.710254	0.900183	1	1

		0.052445	0.22807	0.48119	0.710254	0.900183	1	1
	0	1	1	1	1	1	1	1
	0.133333	0.052445	1	1	1	1	1	1
	0.624224	0.052445	0.22807	0.48119	1	1	1	1
R=	0.934109	0.052445	0.22807	0.48119	0.710254	0.900183	1	1
	1	0.052445	0.22807	0.48119	0.710254	0.900183	1	1
	1	0.052445	0.22807	0.48119	0.710254	0.900183	1	1
	1	0.052445	0.22807	0.48119	0.710254	0.900183	1	1

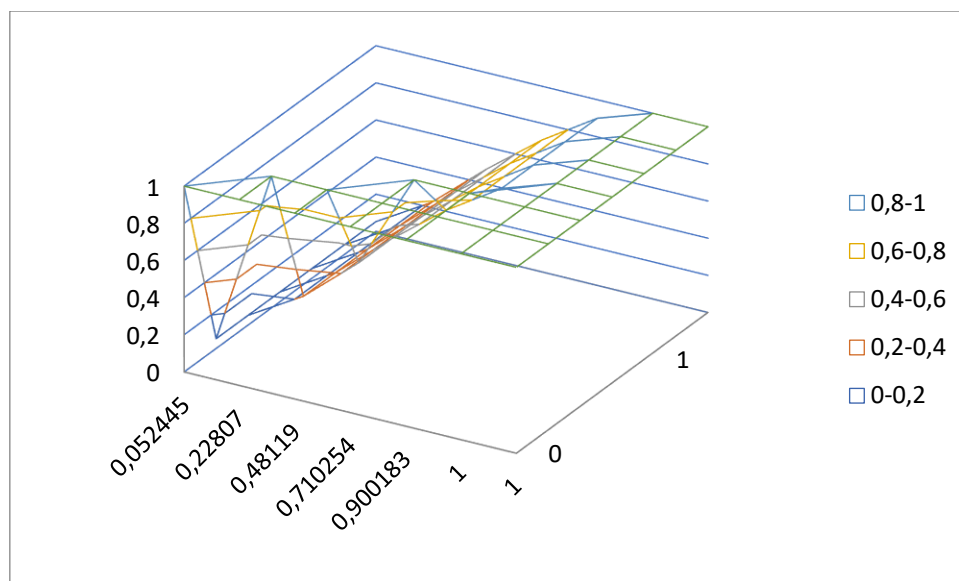


Figure 3. Graphical representation of Gödel's implication

First column of the matrix is defined using Gödel's implication as follow:

IF $a_1 < b_1$, THEN $I(a_1, b_1) = 1$;
 IF $a_2 > b_1$, THEN $I(a_2, b_1) = 0,052445$;
 IF $a_3 > b_1$, THEN $I(a_3, b_1) = 0,052445$;
 IF $a_4 > b_1$, THEN $I(a_4, b_1) = 0,052445$;
 IF $a_5 > b_1$, THEN $I(a_5, b_1) = 0,052445$;
 IF $a_6 > b_1$, THEN $I(a_6, b_1) = 0,052445$;
 IF $a_7 > b_1$, THEN $I(a_7, b_1) = 0,052445$.

Let $a=0$ and $b=0$, then properties of probabilistic implication is satisfied: $I = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq 0 \\ b, & \text{otherwise} \end{cases} = 1$

This points also satisfies the properties of probabilistic implication: $I(0,0)=1$;

$I(1,1)=1$ (see cumulative probability matrix);

$$I(1,0)=0 \quad (I = \begin{cases} 1, & \text{if } a \leq b \\ b, & \text{otherwise} \end{cases} = 0).$$

Or

If $a=0$ and $b=0$ then $I(0,0)=1$. if $a=1$ and $b=1$ then $I(1,1)=1$, if $a=1$ and $b=0$ then $I(1,0)=0$.

IF $b_1 \leq b_2$ THEN $I(a, b_1) \leq I(a, b_2)$ (see matrix if $0,22807 \leq 0,48119$ then $1 \leq 1$, $0,22807 < 0,48119$) satifiers.

The above given analysis proves that the implication of Gödel's fuzzy implication satisfies the properties of a probabilistic implication.

Considering that probabilistic implications are widely used today in the creation of artificial intelligence systems (for example, chatgpt, gemini, etc.), logical deduction, the use of fuzzy logic is an effective approach to eliminate their disadvantages. This idea is eliminated by the formation of the concept of Z-implication [17-20]. Although there are few studies in this area, it is a special

contribution to solving the problems that analysts are focused on, because real problems are characterized by incomplete and inaccurate information. A rational approach is that an initially incomplete or inaccurate description of information leads to incorrect decisions. This is a proven fact from the scientific literature.

It is known that probabilistic implication is broader than the classical binary-valued implication and allows us to describe uncertainty. Unlike true or false-valued implication, probabilistic implication allows us to make decisions in conditions of incomplete information. It is widely used in medicine, industry, and various fields in diagnostics and monitoring issues. On the other hand, people use probabilistic reasoning in decision-making. Probabilistic implications are widely used in dynamic environments and machine learning today.

The advantage of probabilistic implications is their ability to work closer to human thinking. Fuzzy implications are considered a powerful tool in modeling information based on perception. In this regard, there is a great need for implications that satisfy their properties together. This gap is filled in this work. Since the Fodor, Gödel, and Rescher implications satisfy the properties of both fuzzy and probabilistic implications, these implications can be used in the design and comparison of Z-controllers. The theoretical research conducted is focused on improving the mathematical basis of artificial intelligence. This will allow for the creation of smart artificial intelligence tools in the future.

Conclusion. In the considered study, based on the analytical analysis of the implications, 3 implications were selected for the creation of logical inference and expert systems. Probability distributions were found for the B side of the given rule. Considering that the copula works with cumulative probabilities, the distributions were converted to cumulative probability and relation matrices were constructed on them using the implications. It was determined on the basis of a numerical example that the implications satisfy the characteristics of the probability implication. The results of the experiments show that the above given 3 implications are Z-implications. Thus, we have determined that logical inference can be made using these implications and the Z-conditional reasoning algorithm. The advantage of this approach is the possibility of simultaneously performing probability and fuzzy uncertainty in the transformation. In the following studies, it is planned to compare these implications and apply them using verbal information in solving various real-life problems.

REFERENCES

1. Bandler, W.; Kohout, L.J. Fuzzy Relational Products as a Tool for Analysis and Synthesis of the Behavior of Complex Natural and Artificial Systems; Springer: Boston, MA, -1980. - pp. 341–367. DOI:[10.1007/978-1-4684-3848-2_26](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-3848-2_26)
2. Bandler, W.; Kohout, L.J. Semantics of implication operators and fuzzy relational products. International journal of Man-machine Studies. -1980. vol.12, issue 1. pp.89–116. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(80\)80055-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(80)80055-1)
3. De Baets, B.; Kerre, E. Fuzzy relational compositions. Fuzzy Sets and Systems. -1993.- vol.60, issue 1. pp. 109–120. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(93\)90296-T](https://doi.org/10.1016/0165-0114(93)90296-T)
4. Botzoris, G.N.; Papadopoulos, K.; Papadopoulos, B.K. A method for the evaluation and selection of an appropriate fuzzy implication by using statistical data. Fuzzy Economic review. – 2015. vol.0(2) .-pp. 19–29. *RePEc:fzy:fuzeco:v:xx:y:2015:i:2:p:19-29*

5. Cao, N.; Št'epnička, M. Compositions of Partial Fuzzy Relations. *Communications in Computer and Information Science*. -Springer, Cham.-2018. -vol. 855,. -pp.187–198. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91479-4_16
6. Cao, N.; Št'epnička, M.; Burda, M.; Dolny, A. Excluding features in fuzzy relational compositions. *xpert Systems with Applications*. 2017. -vol. 81. -pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.03.033>
7. Fernandez-Peralta R., Massanet S., Mir A. An analysis of the invariance property with respect to powers of nilpotent t-norms on fuzzy implication functions. *Fuzzy Sets and Systems*. -2023. -vol. 466, 108444. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2022.11.015>
8. Mesiar, R.; Kolesárová, A. Copulas and fuzzy implications. *International journal Approximate Reasoning*.- 2020. vol. 117,. p.52–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.11.006>
9. Reiser R.H.S., Bedregal B.,Baczyński, M. Aggregating fuzzy implications. *Information Sciences*.- 2013. vol.253, p.126–146. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.08.026>
10. Peng Z. A new family of (A,N)-implications: Construction and properties. *Iran. J. Fuzzy Syst*. -2020,-vol.17. -p. 129–145
11. Alsina, C.; Trillas, E. When (S,N)-implications are (T,T1)-conditional functions? *Fuzzy Sets and Systems*.- 2003. -vol. 134. -p. 305–310. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00178-1](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00178-1)
12. Pinheiro J., Bedregal B., Santiago R.H.N., Santos, H. (T,N)-implications. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Naples, Italy, 9–12 July,- 2017. p. 1–6. doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2017.8015568.
13. Adam Grabovski. Formal introduction to fuzzy implication. *Formalized mathematics*. - 2017. vol.25.- no.3. p.241-248. DOI: 10.1515/forma-2017-0023
14. Latha Devi, R.A., Velammal, G. The Concept of Z-Fuzzy Relation . *Utilitas Mathematica*. – 2023. – vol. 120, – p. 1146-1154.issn 0315-3681
15. Grzegorzewski, P. Probabilistic implications. *Fuzzy Sets and Systems*, – 2013. – vol. 226(1), – p. 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2013.01.003>
16. Aliev R., Aliyev F., Babaev M.. *Fuzzy Process Control and Knowledge Engineering in Petrochemical and Robotic Manufacturing*. Köln: Verlag TÜV Rheinland, – 1991. – 166 p.
17. R.A. Aliev, S.A. Ahmadov, L.A. Gardashova., O.H.Huseynov. Extension of Ali-1 logic to Z-situation. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2025. – vol. 1622, – p. 304-311. DOI: 10.1007/978-3-032-05103-5_38
18. Zadeh L.A. A Note on Z-numbers. *Information Sciences*,.– 2011. – vol. 181, № 14, – p. 2923-2932. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.02.022>
19. Ahmadov S.A. Experimental Selecting Appropriate Fuzzy Implication in Traffic IF-Then Rules. *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. -vol. 610. -p. 40-49. doi.org/10.1007/978-3-031-25252-5_11
20. Ahmadov S.A. Z-implication and its application // *III International Scientific-Practical Conference on Artificial Intelligence Technologies and Aerospace Issues*. – Baku: – 8-9 July, – 2025, – p. 3–9.

QEYRİ-SƏLİS İMPLİKASIYALARIN Z-İMPLİKASIYAYA GENİŞLƏNDİRİLMƏSİ

Əhmədov Ş.A.

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti

Texniki, təşkilati və digər sistemlərdə istənilən idarəetmə prosesinin effektivliyi istifadə edilən qərarların keyfiyyətindən asılıdır. Qərarlar etibarlı məlumatlar əsasında qəbul edildikdə daha faydalı olur. Məlumatın etibarlılığının təsviri həmişə ciddi riyazi qanunauyğunluqlar çərçivəsində mümkün olmur, çünki o, qavrayışa əsaslanır, sözlə ifadə edilir. Kompüterlərdə informasiya emalının binar məntiqə əsaslandığını nəzərə alsaq, bu sahədə çoxsaylı problemlərin olduğu ortaya çıxır. Ehtimal nəzəriyyəsi, qeyri-səlis məntiq və Zadənin son nəzəriyyəsi olan Z-ədəd nəzəriyyəsinə əsaslanan informasiya emalına aid çoxsaylı yanaşmalar mövcuddur. Zadə 1965-ci ildə qeyri-səlis implikasiya, Atanassov 1983-cü ildə intuitiv qeyri-səlis implikasiya, Torra 2010-cu ildə tərəddüdlü qeyri-səlis implikasiya anlayışını, Przemyslav Grzegorzewski 2011-ci ildə yeni ehtimal implikasiyası anlayışını və Zadə Z-ədəd nəzəriyyəsi anlayışını elmə daxil etmişdir. Beləliklə, bu sahədə yeni yanaşmaların inkişafı üçün fundamental biliklər toplanmışdır. Analitik təhlilə əsasən qeyd etmək olar ki, ehtimal və qeyri-səlis implikasiyaları birlikdə istifadə etməklə informasiya emalı probleminin həlli Z-ədəd nəzəriyyəsinə əsaslanan yeni bir yanaşma ilə həll edilə bilər. Məhz bu ideya yeni Z-implikasiyasının (2025-ci ildə) formalaşmasına və ona əsaslanan Z-şərti mühakimə üsulunun yaradılmasına təkan verdi. Bu işdə 3 qeyri-səlis implikasiyanın- Fodor, Gödel, Rescher ehtimal implikasiya olduğunu sübut edəcəyik. Bu da baxılan implikasiyaların Z-implikasiya olduğunu təsdiqləyir.

Açar sözlər: qeyri-səlis məntiq, qeyri-səlis implikasiya, Fodor, Gödel, Rescher implikasiyaları, kopula, ehtimal implikasiyası, Z-implikasiya, informasiya emalı.

Information about the author

Name, surname, fathers name	Workplace	Position, scientific degree, scientific name	Contact
Shamil Ahmadov Azer	Azerbaijan State Oil and Industry University	PhD Student, SABAH Group teacher	ahmadov.shamil@asoiu.edu.az mob: (+994) 55 526-09-01

TƏDRİSİN METODOLOGİYASI

UOT 004:946

DOI: 10.30546/EMNAA.2026.02.28.161

VİRTUAL TƏDRİS TEXNOLOGİYALARININ TƏHSİL KEYFİYYƏTİNƏ TƏSİRİNİN QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ ÜÇÜN İNTEQRASIYALI BAYES VƏ QRAF ƏSASLI YANAŞMA

Əhmədov L.N., Osmanlı T.E.

Milli Aviasiya Akademiyası

Müasir təhsil mühitində virtual tədris texnologiyalarının, xüsusilə virtual reallıq (VR) və artırılmış reallığın (AR) tətbiqi sürətlə artsa da, bu texnologiyaların təhsil keyfiyyətinə real təsirinin obyektiv və sistemli şəkildə qiymətləndirilməsi hələ də aktual problem olaraq qalır. Mövcud tədqiqatların əksəriyyəti əsasən istifadəçi təcrübəsi və dizayn aspektlərinə fokuslanır, halbuki tələbə davranışının zaman dinamikası və tədris resursları ilə qarşılıqlı əlaqələrin struktur təsiri çox vaxt nəzərə alınmır.

Bu məqalədə virtual tədris texnologiyalarının təhsil keyfiyyətinə təsirinin qiymətləndirilməsi üçün Bayes ehtimal yanaşması və qraf nəzəriyyəsi yanaşmalarını birləşdirən integrasiya olunmuş model təklif olunur. Model çərçivəsində tələbə davranışı müxtəlif vəziyyətlər üzrə (passiv, aktiv, yüksək nailiyyətli və uğursuz) təsnif edilir və bu vəziyyətlərə aid olma ehtimalları müşahidə olunan fəaliyyət göstəriciləri əsasında Bayes modeli ilə qiymətləndirilir. Paralel olaraq, tələbə–resurs qarşılıqlı əlaqələrinin intensivliyi qraf əsaslı mərkəzlik metrikləri vasitəsilə analiz olunur. Bu iki yanaşma vahid ümumi keyfiyyət indeksi çərçivəsində integrasiya edilərək təhsil keyfiyyətinin kompleks qiymətləndirilməsinə imkan yaradır.

Aparılan ssenari əsaslı analiz nəticələri göstərir ki, virtual texnologiyalardan istifadənin səviyyəsi artdıqca həm tələbə davranış göstəriciləri, həm də resurslarla qarşılıqlı əlaqələrin intensivliyi əhəmiyyətli dərəcədə yüksəlir. Aşağı texnologiya istifadəsi ssenarisində ümumi keyfiyyət indeksi 0.39 olduğu halda, yüksək texnologiya istifadəsi şəraitində bu göstərici 0.71-ə qədər artır. Qraf analizi VR laboratoriyalarının və forum müzakirələrinin öyrənmə prosesinə ən böyük töhfəni verdiyini, xüsusilə yüksək nailiyyətli və aktiv tələbələr üçün əsas təsir mərkəzləri olduğunu göstərir.

Əldə olunan nəticələr göstərir ki, virtual tədris texnologiyalarının integrativ və məqsədyönlü tətbiqi yalnız tələbə iştirakını artırmır, eyni zamanda tələbə davranış profillərinə və öyrənmə trayektoriyalarına təsir edərək təhsil keyfiyyətinin ölçülə bilən şəkildə yüksəlməsinə gətirib çıxarır. Təklif olunan model tələbə davranışlarının ehtimal əsaslı qiymətləndirilməsi, risk qrupunun erkən mərhələdə müəyyənləşdirilməsi və tədris strategiyalarının adaptiv şəkildə optimallaşdırılması üçün praktik və proqnozlaşdırma potensialına malik alət kimi çıxış edir.

Açar sözlər: virtual tədris texnologiyaları, virtual reallıq, Bayes ehtimal modeli, qraf nəzəriyyəsi, təhsil keyfiyyəti, tələbə davranışının modelləşdirilməsi.

Giriş. Müasir dövrdə təhsil prosesində virtual texnologiyaların – xüsusilə virtual reallıq (VR), artırılmış reallıq (AR) və virtual tədris mühitlərinin – tətbiqi sürətlə genişlənir. Pandemiya sonrası

dövrə bu texnologiyalar distant və hibrid təhsilin ayrılmaz tərkib hissəsinə çevrilmiş, öyrənmə prosesinin interaktivliyini və əlçatanlığını əhəmiyyətli dərəcədə artırmışdır.

Mövcud sistemə icmalar göstərir ki, VR ali təhsildə perspektivli texnologiya kimi qəbul olunur, lakin tədqiqatların əksəriyyəti əsasən dizayn elementləri və istifadəçi təcrübəsinə fokuslanmış, öyrənmə nəticələrinin obyektiv qiymətləndirilməsi isə yetərinə aparılmamışdır [1,2]. Digər tərəfdən, bəzi tədqiqatlar tam iştiraklı VR mühitlərinin emosional yüklənmə və əlavə diqqət dağınıqlığı səbəbilə öyrənmə nəticələrinə mənfi təsir göstərə biləcəyini vurğulayır [3]. Bu isə göstərir ki, VR/AR texnologiyalarının təhsil keyfiyyətinə real təsirinin modellərlə qiymətləndirilməsi xüsusi aktuallıq kəsb edir.

AR texnologiyalarının təhsildə tətbiqi üzrə aparılan tədqiqatlar da göstərir ki, bu texnologiyalar böyük potensiala malik olsa da, metodoloji yanaşmaların və sistemli qiymətləndirmə mexanizmlərinin seçimi sahəsində boşluqlar mövcuddur [4,5]. Son tədqiqatlar göstərir ki, virtual laboratoriyalar və rəqəmsal tədris mühitlərinin analizi öyrənmə nəticələrinin və təhsil keyfiyyətinə təsir edən faktorların daha dəqiq qiymətləndirilməsinə imkan verir [6]. Eyni zamanda, müxtəlif maşın öyrənməsi alqoritmlərinin (CATBoost, XGBoost, Random Forest və s.) tətbiqi tələbə iştirak səviyyəsinin yüksək dəqiqliklə proqnozlaşdırılmasını təmin edir və qraf əsaslı yanaşmalar onlayn tədrisdə tələbə–məzmun qarşılıqlı əlaqələrini qiymətləndirərək öyrənmə nəticələrini yaxşılaşdırmağa imkan verir [7,8].

Bu məqalənin məqsədi virtual texnologiyaların təhsilin keyfiyyətinə təsir mexanizmini formal modellərlə ifadə etmək, Bayes ehtimal yanaşması və qraf nəzəriyyəsi əsasında tələbə davranışı və tədris mühitinin qarşılıqlı əlaqələrini sistemli şəkildə qiymətləndirməkdir.

Son empirik tədqiqatlar göstərir ki, virtual laboratoriyaların süni intellekt əsaslı analizlərlə birləşdirilməsi tələbələrə akademik nailiyyətlərinə, motivasiya və iştirak səviyyəsinə əhəmiyyətli müsbət təsir göstərir. Xüsusilə, öyrənlərin davranış məlumatları əsasında aparılan qeyri-xətti analizlər onların fəaliyyət göstəricilərinin fərqlərini izah edən əsas amilləri aşkar etməyə imkan vermişdir [9,10]. Lakin bu cür nəticələrin öyrənmə prosesinin kumulyativ xarakterini nəzərə alan ehtimal modelləri və struktur analiz yanaşmaları vasitəsilə ümumiləşdirilmiş və sistemli qiymətləndirilməsi problemi aktual olaraq qalır.

Metodologiya. Virtual tədris texnologiyalarının təhsil keyfiyyətinə təsirini qiymətləndirmək üçün sistemli yanaşma tələb olunur [11]. Bu məqsədlə, tələbə fəaliyyətini təsvir edən dinamik model qurulmuşdur. Model iki əsas istiqaməti birləşdirir:

1. Bayes ehtimal yanaşması əsasında tələbə davranış vəziyyətlərinin qiymətləndirilməsi [12].
2. Qraf nəzəriyyəsi əsasında tələbə–məzmun qarşılıqlı əlaqələrinin analizi [13].

Bu yanaşmaların birləşdirilməsi təhsil keyfiyyətinə təsir edən amillərin həm ehtimal əsaslı qiymətləndirmə (Bayes modeli), həm də struktur xarakteristikaları (qraf modeli) əsasında intellektual şəkildə analizinə imkan verir. Eyni zamanda, süni intellekt yanaşmalarında geniş istifadə olunan multi-agent sistemləri də mürəkkəb proseslərin modelləşdirilməsində effektiv alət kimi çıxış edir və tələbə davranışlarının kollektiv səviyyədə qiymətləndirilməsi üçün nəzəri əsas yaradır [14].

Virtual tədris mühitində tələbələrə öyrənmə davranışı dinamik və qeyri-sabit xarakter daşıyır. Bu davranış müxtəlif vəziyyətlər üzrə təsnif edilə bilər və tələbənin müəyyən davranış vəziyyətində olma ehtimalı müşahidə olunan fəaliyyət göstəriciləri əsasında qiymətləndirilir. Bu məqsədlə Bayes ehtimal yanaşmasına əsaslanan model qurulmuşdur.

Fəaliyyət profillərinin müəyyənləşdirilməsi üçün göstəricilər 0–1 intervalında normallaşdırılmış və ümumi fəaliyyət göstəricisi $F = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)/4$ düsturu ilə hesablanmışdır:

Burada, $D_1 : 0 \leq F < 0.30$, $D_2 : 0.30 \leq F < 0.60$, $D_3 : 0.60 \leq F \leq 1.00$, D_4 isə göstəricilər arasında yüksək dəyişkənlik müşahidə olunan hallarda qeyri-sabit profil kimi müəyyən edilmişdir.

Bayes yanaşması çərçivəsində tələbələrin öyrənmə prosesində mümkün vəziyyətləri aşağıdakı kimi müəyyən edilmişdir:

1. S_1 – Passiv iştirakçı (minimal davamiyyət, tapşırıqların yerinə yetirilməməsi),
2. S_2 – Aktiv iştirakçı (müzakirələrdə və tapşırıqlarda müntəzəm iştirak),
3. S_3 – Yüksək nailiyyətli tələbə (stabil nəticələr və yüksək akademik göstəricilər),
4. S_4 – Aşağı nəticəli / uğursuz tələbə (geriləmə, imtahanlarda aşağı nəticə).

Müşahidə olunan göstəricilər (xüsusiyyətlər) olaraq aşağıdakılar götürülmüşdür:

5. platformaya giriş tezliyi
6. tapşırıq yerinə yetirmə faizi
7. forum aktivliyi
8. qiymətlər və s.

Bu zaman əsas məqsəd: $P(S_i | D)$ - tələbənin müəyyən vəziyyətə aid olma ehtimalını tapmaqdır. Bu isə klassik olaraq Bayes teoremi ilə hesablanır. Bayes yanaşmasına əsasən tələbənin hər bir davranış vəziyyətində olma ehtimalı müşahidə olunan fəaliyyətlərə əsaslanaraq yenilənir. Bu çərçivədə tələbənin müəyyən S_i vəziyyətində olma posterior ehtimalı Bayes teoreminə uyğun olaraq hesablanır:

$$P(S_i|D) = \frac{(P(D|S_i) \cdot P(S_i))}{P(D)} \quad (1)$$

Burada D – müşahidə olunan göstəricilər vektorudur və virtual texnologiyalar bu vektorun bir komponentidir: $D=[x_1, x_2, x_3, x_4]$, harada ki, x_1 – forum aktivliyi, x_2 – tapşırıqların icra səviyyəsi, x_3 – VR laboratoriyadan istifadə intensivliyi, x_4 – onlayn mühazirələrdə iştirak tezliyidir. $P(S_i)$ – ilkin (prior) ehtimal, $P(D|S_i)$ – tələbənin i -ci davranış vəziyyətində olduğu halda müşahidə olunan fəaliyyət göstəricilərinin yaranma ehtimalı, $P(D)$ müşahidə olunan məlumatın ümumi ehtimalı, $P(S_i|D)$ isə tələbənin AR və ya VR istifadə etdikdə i -ci davranış vəziyyətində olma posterior ehtimalını ifadə edir.

Beləliklə, Bayes modeli çərçivəsində tələbənin davranış vəziyyəti virtual tədris texnologiyalarından istifadə göstəricilərinə əsaslanaraq qiymətləndirilir və bu təsir (1)-də verilmiş ehtimal modeli vasitəsilə ifadə olunur.

Bu yanaşma tələbənin davranış vəziyyətlərinin bir-birindən asılı şəkildə dəyişməsinə nəzərə alır və müxtəlif fəaliyyət göstəricilərinin təsiri altında ehtimalların dinamik şəkildə yenilənməsinə və probabilistik, yəni ehtimallar əsasında qərar verilməsinə imkan verir. Real həyatda bunun səbəbi məlumatların natamamlığı, davranışın dəyişkənliyi və ölçmələrdəki səhvlərdir. Bu yanaşma tələbə davranışının qeyri-müəyyənliyini nəzərə almağa və sərt deterministik təsnifat əvəzinə ehtimal əsaslı qiymətləndirmə aparmağa imkan verir.

Yuxarıda qeyd etdiyimiz kimi, Bayes modeli çərçivəsində tələbənin müəyyən davranış vəziyyətində olma ehtimalı müşahidə olunan fəaliyyət göstəricilərinə əsasən qiymətləndirilmişdir. Bu məqsədlə dörd tipik müşahidə profili müəyyən edilmişdir: aşağı fəaliyyət profili (forum aktivliyinin zəif olması, tapşırıqların yerinə yetirilməməsi, VR istifadəsinin aşağı səviyyədə olması - D_1), orta fəaliyyət profili (müntəzəm iştirak, tapşırıqların qismən icrası - D_2), yüksək fəaliyyət profili (forum aktivliyi, tapşırıqların tam icrası və VR istifadəsinin yüksək səviyyədə olması - D_3) və qeyri-sabit fəaliyyət profili (qeyri-müntəzəm iştirak, aşağı qiymətlər və zəif fəaliyyət göstəriciləri - D_4). Hər bir profil üzrə davranış vəziyyətlərinin uyğunluq dərəcəsi əvvəlcədən təyin edilmiş ballar vasitəsilə ifadə

olunmuş, daha sonra bu ballar normallaşdırılaraq şərti ehtimallar əldə edilmişdir. Real sistemlərdə balların təyin olunmasında 3 yanaşma mövcuddur:

1. Ekspert əsaslı (heuristic) - ballar mütəxəssis tərəfindən verilir;
2. Statistik yanaşma (data-driven) - əgər real məlumat varsa: $P(D_j|S_i) = \frac{\text{say}(D_j \cap S_i)}{\text{say}(S_i)}$, yəni neçə tələbə həm S_i vəziyyətindədir, həm də D_j profilindədir;
3. Öyrənilən model (MÖ yanaşması) - ballar ümumiyyətlə “verilmir”, model özü öyrənir.

Balların təyini zamanı aşağı fəaliyyət göstəricilərinə malik müşahidələrin passiv və uğursuz vəziyyətlərlə, yüksək fəaliyyət göstəricilərinə malik müşahidələrin isə aktiv və yüksək nailiyyətli vəziyyətlərlə daha yüksək uyğunluq göstərdiyi nəzərə alınmışdır. Bu yanaşma tələbə davranışının real fəaliyyət indikatorları ilə əlaqələndirilməsinə və modelin daha interpretasiya edilə bilən olmasına imkan verir. Bizim modeldə ilkin uyğunluq balları tarixi verilənlər əsasında empirik olaraq təyin olunmuşdur:

Cədvəl 1

İlkin uyğunluq balları

Vəziyyət/profil	D ₁ (aşağı)	D ₂ (orta)	D ₃ (yüksək)	D ₄ (qeyri-sabit)
S ₁ (passiv)	9	3	1	6
S ₂ (aktiv)	3	8	4	5
S ₃ (yüksək)	1	5	9	2
S ₄ (uğursuz)	7	2	1	8

Növbəti addımda hər profil üçün cəm hesablanır:

- D₁: 9 + 3 + 1 + 7 = 20
- D₂: 3 + 8 + 5 + 2 = 18
- D₃: 1 + 4 + 9 + 1 = 15
- D₄: 6 + 5 + 2 + 8 = 21

Sonra isə $P(S_i | D_j)$ şərti ehtimallar cədvəli formalaşdırılır:

Cədvəl 2

Şərti ehtimallar

Vəziyyət/profil	D ₁ (aşağı)	D ₂ (orta)	D ₃ (yüksək)	D ₄ (qeyri-sabit)
S ₁ (passiv)	0.45	0.17	0.07	0.29
S ₂ (aktiv)	0.15	0.44	0.27	0.24
S ₃ (yüksək)	0.05	0.28	0.60	0.10
S ₄ (uğursuz)	0.35	0.11	0.07	0.38

Əgər əvvəlcədən məlumat yoxdursa $P(S_i)=0.25$ götürülür. D₃ (yüksək fəaliyyət profili) üçün nümunə hesablaması aşağıdakı cədvəldə (cədvəl 3) verilmişdir:

Cədvəl 3

Nümunə hesablama (D_3 üçün)	
Vəziyyət	Hesablama
S_1 (passiv)	$0.07 \times 0.25 = 0.0175$
S_2 (aktiv)	$0.27 \times 0.25 = 0.0675$
S_3 (yüksək)	$0.60 \times 0.25 = 0.1500$
S_4 (uğursuz)	$0.07 \times 0.25 = 0.0175$

Cəm = 0.2525 alınır ki, bu da D_3 profilinin ümumi yaranma ehtimalını ifadə edir: “bütün tələbələr arasında D_3 (yüksək fəaliyyət profili) müşahidə olunma ehtimalı təxminən 25.25%-dir”. Bu o deməkdir ki, D_3 davranışı 4 tələbə qrupunun hamısında var və bu göstərici D_3 profilinin ümumi ehtimal payını ifadə edir.

Hesablanmış şərti ehtimallar əsasında tələbələrin müxtəlif davranış vəziyyətlərinə aid olma ehtimal paylanması müəyyən edilir. Bu ehtimallar tələbələrin müşahidə olunan fəaliyyət göstəricilərinə əsaslanaraq onların cari akademik vəziyyətini qiymətləndirməyə imkan verir və təhsil keyfiyyətinin ümumi səviyyəsinin təhlili üçün istifadə olunur [15].

Bu göstəricilər əsasında tələbə davranışının ümumiləşdirilmiş keyfiyyət səviyyəsi Bayes ehtimal yanaşmasına uyğun şəkildə müəyyən edilir. Beləliklə, model yalnız tələbələrin davranış xüsusiyyətlərini deyil, həm də virtual tədris texnologiyalarının onların fəaliyyətinə təsirini ehtimal baxımından qiymətləndirməyə imkan verir.

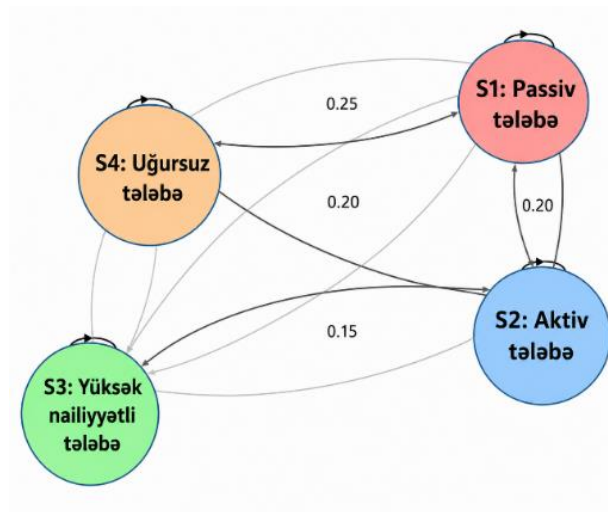
Şəkil 1-də tələbə davranış vəziyyətləri arasında ehtimal əsaslı əlaqələr göstərilmişdir. Bu diaqramda düyünlər tələbələrin müxtəlif davranış vəziyyətlərini (passiv, aktiv, yüksək nailiyyətli və uğursuz) ifadə edir, əlaqələr isə bu vəziyyətlər arasında ehtimal baxımından əlaqələri əks etdirir. Xətlərin qalınlığı uyğunluq ehtimalının böyüklüyünü göstərir. Məsələn, yüksək fəaliyyət göstəricilərinə malik tələbələrin yüksək nailiyyətli vəziyyətə aid olma ehtimalı daha yüksək olduğu halda, aşağı fəaliyyət göstəricilərinə malik tələbələrin passiv və ya uğursuz vəziyyətlərə aid olma ehtimalı üstünlük təşkil edir.

Bu qarşılıqlı əlaqələr qraf nəzəriyyəsinin klassik yanaşmalarına uyğun olaraq çəkili qraf modeli vasitəsilə təsvir olunur [16,17]. Qraf düyünləri tələbələri, müəllimləri və tədris resurslarını, əlaqələr isə onların arasındakı qarşılıqlı təsirləri ifadə edir. Əlaqələrin intensivliyi resurslardan istifadə tezliyi, forum müzakirələrində aktivlik, VR laboratoriyalarda sərf olunan vaxt və tapşırıqların icra səviyyəsi kimi göstəricilər əsasında qiymətləndirilir. Bu modelin üstünlüyü ondan ibarətdir ki, ən təsirli tədris resurslarını və öyrənməyə ən çox töhfə verən qarşılıqlı əlaqələri aşkar etməyə imkan verir [18].

Cədvəl 4-də təqdim olunan nəticələr tələbə–resurs qarşılıqlı əlaqələri əsasında qurulmuş qraf modeli üzrə hesablanmış mərkəzlik göstəricilərini əks etdirir. Qraf modeli tələbələrin müxtəlif tədris resursları ilə qarşılıqlı əlaqələrinin intensivliyi əsasında formalaşdırılmışdır. Bu məqsədlə tələbələrin forum müzakirələrində iştirakı, tapşırıqların icra tezliyi, VR laboratoriyalarda sərf olunan vaxt və onlayn mühazirələrdə iştirak göstəriciləri nəzərə alınmışdır.

Qrafın qurulması zamanı düyünlər tədris resurslarını (VR laboratoriya, forum, tapşırıq sistemi, onlayn mühazirə), əlaqələr isə tələbələrin bu resurslar arasında keçid və birgə istifadə

intensivliyini ifadə edir. Əlaqələrin çəkisi tələbələrin müvafiq resurslardan istifadə tezliyi və intensivliyi əsasında normallaşdırılmış göstəricilər kimi müəyyən edilmişdir.



Şəkil 1. Tələbə davranış vəziyyətlərinin ehtimal əsaslı əlaqə diaqramı

Bu qraf əsasında hər bir resurs üçün dərəcə mərkəzliyi və aralıq mərkəzliyi göstəriciləri hesablanmışdır. Dərəcə mərkəzliyi resursun digər resurslarla birbaşa əlaqələrinin intensivliyini, aralıq mərkəzliyi isə həmin resursun digər resurslar arasında əlaqələndirici rolunu ifadə edir.

Dərəcə mərkəzliyi hər bir düyünün digər düyünlərlə birbaşa əlaqələrinin ümumi çəkisini göstərir və aşağıdakı kimi hesablanır:

$$C_D(i) = \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \quad (2)$$

burada ω_{ij} i və j düyünləri arasındakı əlaqənin çəkisini ifadə edir. Hesablanmış dəyərlər maksimum mümkün qiymətə bölünərək 0–1 intervalında normallaşdırılmışdır:

İkinci mühüm göstərici aralıq mərkəzliyidir. Aralıq mərkəzliyi düyünün digər düyünlər arasında vasitəçi rolunu qiymətləndirir və aşağıdakı kimi müəyyən edilir:

$$C_B(i) = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \quad (3)$$

burada σ_{st} s və t düyünləri arasındakı ən qısa yolların sayını, $\sigma_{st}(i)$ isə bu yollardan i düyünündən keçənlərin sayını göstərir. Bu göstərici də normallaşdırılaraq 0–1 intervalına gətirilmişdir.

Məsələn, VR laboratoriya düyünü üçün digər resurslarla (forum müzakirəsi, tapşırıq sistemi və onlayn mühazirə) əlaqələrin çəkili müvafiq olaraq 0.30, 0.27 və 0.25 kimi müəyyən edilmişdir. Bu halda dərəcə mərkəzliyi aşağıdakı kimi hesablanır:

$$C_D(VR) = 0,30 + 0,27 + 0,25 = 0,82$$

Göründüyü kimi, VR laboratoriya ən yüksək dərəcə mərkəzliyinə (0.82) və aralıq mərkəzliyinə (0.67) malikdir. Bu nəticə göstərir ki, VR mühiti həm birbaşa qarşılıqlı əlaqələrin

intensivliyində, həm də digər resurslar arasında əlaqələndirici roluna görə əsas təsir mərkəzidir. Forum müzakirələri də yüksək göstəricilərə malik olaraq tələbələrin öyrənmə fəaliyyətini dəstəkləyən mühüm qarşılıqlı əlaqə elementi kimi çıxış edir. Tapşırıq sistemi və onlayn mühazirələr isə nisbətən aşağı mərkəzlik göstəricilərinə malik olsa da, ümumi tədris strukturunun sabitliyinin təmin edilməsində vacib rol oynayır.

Alınmış nəticələr göstərir ki, tələbələrin daha çox interaktiv və tətbiqyönümlü resurslarla (xüsusilə VR laboratoriyalar və forum müzakirələri) qarşılıqlı əlaqəsi onların ümumi öyrənmə prosesində daha aktiv iştirakını təmin edir və bu resurslar təhsil keyfiyyətinə daha yüksək təsir göstərir. Oxşar alqoritmik və statistik qiymətləndirmə yanaşmalarının proqnozlaşdırma məsələlərində tətbiqi digər sahələrdə də yüksək effektivlik nümayiş etdirmişdir. Xüsusilə qeyri-müntəzəm proseslərin modelləşdirilməsində xətti və qeyri-xətti modellərin müqayisəsinə əsaslanan yanaşmaların qiymətləndirmə dəqiqliyini artırdığı göstərilmişdir [19].

Cədvəl 4

Resursların qraf mərkəzlik göstəriciləri

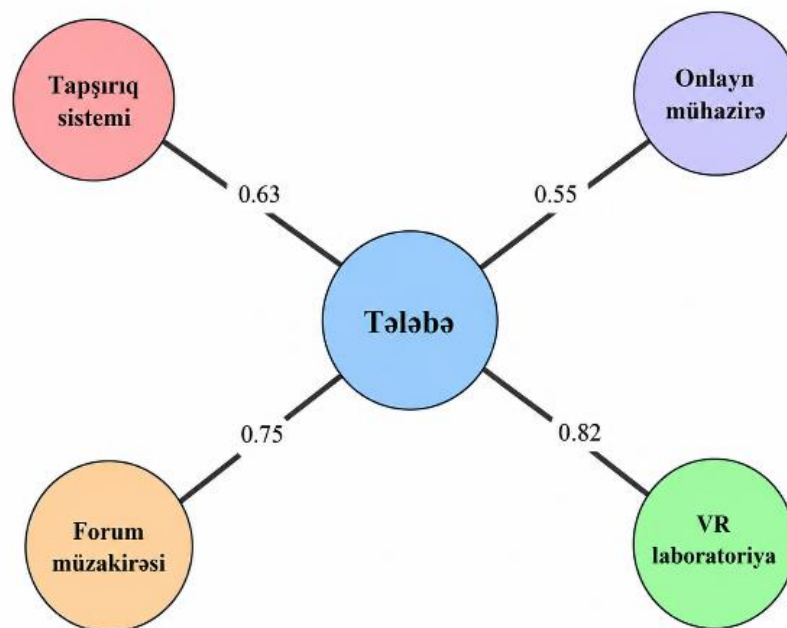
Resurs	Dərəcə mərkəzliyi	Aralıq mərkəzliyi	Təhsilə təsir dərəcəsi
VR laboratoriya	0.82	0.67	Yüksək
Forum müzakirəsi	0.75	0.58	Orta-yüksək
Tapşırıq sistemi	0.63	0.41	Orta
Onlayn mühazirə	0.55	0.35	Orta

Alınmış nəticələr göstərir ki, tələbələrin daha çox interaktiv və tətbiqyönümlü resurslarla (xüsusilə VR laboratoriyalar və forum müzakirələri) qarşılıqlı əlaqəsi onların ümumi öyrənmə prosesində daha aktiv iştirakını təmin edir və bu resurslar təhsil keyfiyyətinə daha yüksək təsir göstərir. Oxşar alqoritmik və statistik qiymətləndirmə yanaşmalarının proqnozlaşdırma məsələlərində tətbiqi digər sahələrdə də yüksək effektivlik nümayiş etdirmişdir. Xüsusilə qeyri-müntəzəm proseslərin modelləşdirilməsində xətti və qeyri-xətti modellərin müqayisəsinə əsaslanan yanaşmaların qiymətləndirmə dəqiqliyini artırdığı göstərilmişdir [19].

Şəkil 2-də tələbə ilə virtual tədris resursları arasındakı qarşılıqlı əlaqələrin qraf təsviri göstərilmişdir. Burada tələbə mərkəzi düyün kimi təqdim olunur və digər resurslarla əlaqələr çəkili qraf şəklində əks etdirilir. Əlaqələrin çəkisi tələbələrin müvafiq resurslardan istifadə intensivliyini ifadə edir və əvvəlki hissədə təsvir olunan normallaşdırılmış fəaliyyət göstəriciləri əsasında müəyyən edilmişdir.

Şəkildən göründüyü kimi, VR laboratoriya ən yüksək dərəcə mərkəzliyi göstəricisinə (0.82) malikdir ki, bu da tələbələrin bu resursdan daha intensiv istifadə etdiyini göstərir. Forum müzakirəsi (0.75) və tapşırıq sistemi (0.63) orta səviyyəli qarşılıqlı əlaqə göstəricilərinə malikdir, onlayn mühazirə isə nisbətən daha aşağı intensivliklə (0.55) xarakterizə olunur.

Bu vizual təsvir qraf modelində əldə olunmuş mərkəzlik göstəricilərini intuitiv şəkildə təqdim edir və təhsil mühitində hansı resursların daha böyük rol oynadığını aydın şəkildə göstərir. Beləliklə, qraf modeli tələbə fəaliyyətlərinin struktur xüsusiyyətlərini və resurslar arasında qarşılıqlı əlaqələrin intensivliyini müəyyən etməyə imkan verir.



Şəkil 2. Tələbə–resurs qarşılıqlı əlaqələrinin qraf təsviri

Yuxarıda təqdim olunan yanaşmalar təhsil keyfiyyətinin müxtəlif aspektlərini əks etdirir:

- Bayes modeli tələbələrin müşahidə olunan fəaliyyətlərinə əsaslanaraq onların davranış vəziyyətlərinin ehtimal paylanması müəyyən edir;
- Qraf modeli isə tələbə–resurs qarşılıqlı əlaqələrinin intensivliyini, ən təsirli tədris texnologiyalarını aşkar etməyə imkan verir.

Q_{Bayes} göstəricisi tələbələrin müxtəlif davranış vəziyyətlərinə aid olma posterior ehtimallarının çəkili ortası kimi müəyyən edilir:

$$Q_{Bayes} = \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot P(S_i|D) \quad (4)$$

burada $P(S_i|D)$ – tələbənin i -ci davranış vəziyyətində olma posterior ehtimalı, ω_i – müvafiq davranış vəziyyətinin təhsil keyfiyyətinə təsirini əks etdirən çəkidir. Posterior ehtimal tələbənin müşahidə olunan fəaliyyət göstəricilərinə əsasən müəyyən davranış vəziyyətində olma ehtimalını ifadə edir. Bu ehtimallar Bayes teoreminə əsasən yenilənir və tələbənin cari davranış vəziyyətini qiymətləndirməyə imkan verir. Ümumi davranış keyfiyyəti (4)-də verilmiş ifadəyə əsasən posterior ehtimalların çəkili ortası kimi hesablanır.

İnteqrasiya olunmuş qiymətləndirmə üçün ümumi keyfiyyət indeksi (ÜKİ) təklif olunur (5):

$$\text{ÜKİ} = \alpha \cdot Q_{Bayes} + \beta \cdot Q_{Graf}, \quad \alpha + \beta = 1 \quad (5)$$

burada Q_{Bayes} – Bayes ehtimal modeli əsasında hesablanmış davranış keyfiyyət göstəricisi, Q_{Graf} – qraf əsaslı intensivlik metrikləri əsasında qiymətləndirilmiş struktur keyfiyyət göstəricisi, α ,

β – uyğun çəkildir (praktikada kontekstdən asılı olaraq 0.4–0.6 intervalında seçilə bilər). Ümumi keyfiyyət indeksi (5)-ə uyğun olaraq bu iki komponentin inteqrasiyası nəticəsində hesablanır.

Bu tədqiqatda davranış vəziyyətlərinə uyğun çəkilər ω_i tələbə vəziyyətlərinin təhsil keyfiyyətinə nisbi töhfəsini əks etdirmək empirik olaraq müəyyən edilmişdir. Yüksək nailiyyətli vəziyyət üçün daha yüksək, passiv və uğursuz vəziyyətlər üçün isə nisbətən aşağı çəkilər qəbul edilmişdir. İnteqrasiya çəkiləri α və β davranış komponenti ilə struktur komponentin balanslı təsirini təmin etmək məqsədilə bərabər seçilmişdir ($\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$).

Bu yanaşma tələbə fəaliyyətlərinin ehtimal paylanmasını nəzərə alır. Bu isə onların ümumi davranış keyfiyyətinin daha dəqiq qiymətləndirilməsinə imkan verir. Beləliklə, Bayes modeli tələbənin yalnız bir vəziyyətə aid edilməsini deyil, müxtəlif vəziyyətlər üzrə ehtimal paylanmasını nəzərə alaraq daha dəqiq və elastik qiymətləndirmə təmin edir.

Q_{qraf} göstəricisi isə tələbə–resurs qarşılıqlı əlaqələrinin intensivliyini və struktur xüsusiyyətlərini əks etdirən qraf mərkəzlik metriklərinə əsaslanır. Bu göstərici tədris resurslarının öyrənmə prosesinə təsir dərəcəsini qiymətləndirməyə imkan verir.

Beləliklə, Bayes modeli üzrə hesablanmış davranış göstəriciləri və qraf əsaslı struktur metriklər inteqrasiya olunmuş qiymətləndirmə modeli çərçivəsində birləşdirilərək ümumi keyfiyyət indeksi (ÜKİ) əldə olunur. Bu inteqrasiyanın əsas üstünlüyü ondadır ki, model yalnız tələbənin davranış nəticələrini deyil, həm də texnologiyaların istifadəsini və öyrənmə prosesinə verdiyi töhfəni vahid qiymətləndirmə çərçivəsində əks etdirir.

Müasir tədqiqatlar göstərir ki, təlim prosesinin optimallaşdırılması zamanı davranış və struktur göstəriciləri ilə yanaşı, fərdi və psixofizioloji xüsusiyyətlərin də nəzərə alınması modellərin praktik effektivliyini artırır. Bu cür yanaşmalar intellektual trenajor və simulyator əsaslı təlim mühitlərində uğurla tətbiq edilmişdir [20].

Cədvəl 5-də inteqrasiya olunmuş yanaşma üzrə nümunəvi nəticələr təqdim olunmuşdur. Burada Bayes ehtimal modeli əsasında hesablanmış davranış göstəriciləri (Q_{Bayes}) və qraf modeli əsasında əldə olunmuş struktur göstəricilər (Q_{qraf}) birləşdirilərək ümumi keyfiyyət indeksi (ÜKİ) müəyyən edilmişdir.

Cədvəl 5

İnteqrasiya olunmuş qiymətləndirmənin nəticələri (nümunəvi göstəricilər)

Qrup \ Resurs vəziyyəti	Q_{Bayes}	Q_{qraf}	Ümumi keyfiyyət indeksi (ÜKİ)
Passiv tələbələr (S_1)	0.25	0.30	0.28
Aktiv tələbələr (S_2)	0.30	0.48	0.39
Yüksək nailiyyətli tələbələr (S_3)	0.36	0.66	0.51
Uğursuz tələbələr (S_4)	0.20	0.25	0.23

Cədvəldə təqdim olunan Q_{Bayes} göstəriciləri tələbələrin müşahidə olunan fəaliyyət profilləri əsasında hesablanmış posterior ehtimalların çəkili ortası kimi müəyyən edilmişdir. Q_{qraf} göstəriciləri isə tələbə–resurs qarşılıqlı əlaqələrinin intensivliyini əks etdirən qraf mərkəzlik metriklərinin normallaşdırılması yolu ilə əldə olunmuşdur. Ümumi keyfiyyət indeksi (ÜKİ) isə bu iki göstəricinin inteqrasiyası nəticəsində hesablanmışdır.

Göründüyü kimi, inteqrasiya olunmuş yanaşma nəticəsində ən yüksək göstərici yüksək nailiyyətli tələbələr (S_3) üçün müşahidə olunur. Bu, həmin tələbələrin həm davranış baxımından

yüksək ehtimalla uğurlu kateqoriyaya aid olması, həm də tədris resurslarından daha intensiv və səmərəli istifadə etməsi ilə izah olunur. Aktiv tələbələr (S_2) üçün orta-yüksək səviyyəli nəticələr əldə edilmişdir ki, bu da onların stabil fəaliyyət göstəricilərinə malik olduğunu göstərir.

Əksinə, passiv (S_1) və uğursuz (S_4) tələbələr üçün ÜKİ göstəriciləri daha aşağıdır. Bu qruplarda həm davranış ehtimallarının aşağı keyfiyyətli vəziyyətlərə yönəlməsi, həm də resurslardan istifadənin zəif olması müşahidə olunur. Bu nəticə göstərir ki, tələbələrin fəaliyyət intensivliyi və resurslarla qarşılıqlı əlaqəsi təhsil keyfiyyətinin formalaşmasında həlledici rol oynayır.

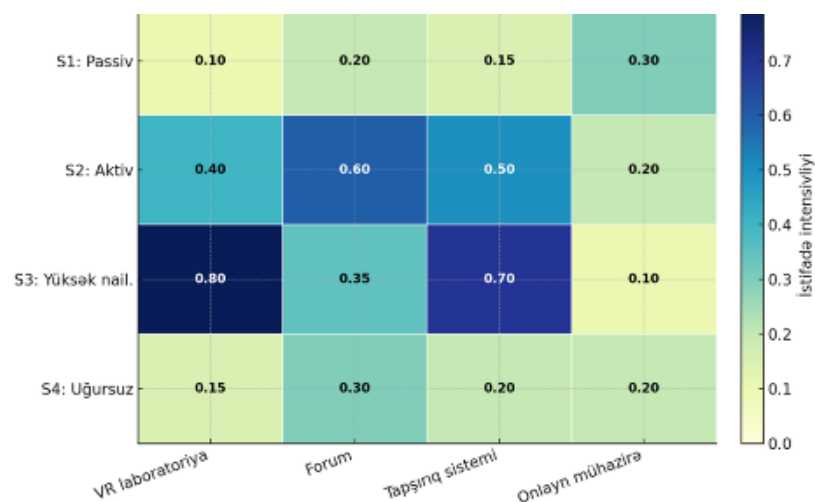
Şəkil 3 tələbə davranış vəziyyətləri ilə virtual tədris resursları arasındakı istifadə intensivliyinin istilik xəritəsini göstərir. Xəritədə təqdim olunan dəyərlər (0–1 intervalında) tələbələrin müxtəlif resurslardan istifadə səviyyəsinin normallaşdırılmış göstəricilərini əks etdirir. Bu göstəricilər tələbə fəaliyyətlərinə dair log məlumatları (forum aktivliyi, tapşırıq icrası, VR istifadəsi və mühazirələrdə iştirak tezliyi) əsasında hesablanmış və müqayisə edilə bilən formada təqdim olunmuşdur.

Şəkildən göründüyü kimi, yüksək nailiyyətli tələbələr (S_3) VR laboratoriyadan ən intensiv şəkildə (0.80) istifadə edir ki, bu da tətbiqyönlü və interaktiv resursların yüksək akademik nəticələrlə əlaqəli olduğunu göstərir. Eyni zamanda, bu qrup üçün tapşırıq sistemi üzrə yüksək intensivlik (0.70) də müşahidə olunur ki, bu da onların sistemli və davamlı fəaliyyət göstərdiyini təsdiqləyir.

Aktiv tələbələr (S_2) üçün forum müzakirələri (0.60) və tapşırıq sistemi (0.50) əsas fəaliyyət istiqamətləri kimi çıxış edir. Bu isə sosial qarşılıqlı əlaqə və müntəzəm tapşırıq icrasının bu qrup üçün xarakterik olduğunu göstərir.

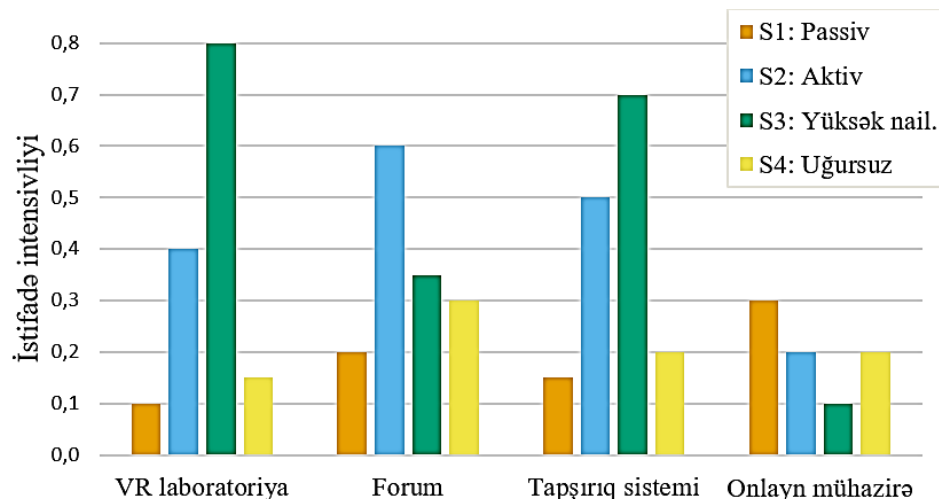
Passiv (S_1) və uğursuz (S_4) tələbələrdə isə bütün resurslar üzrə istifadə intensivliyi nisbətən aşağı səviyyədədir. Bu qruplarda xüsusilə VR laboratoriya və forum aktivliyinin zəif olması onların ümumi öyrənmə prosesində daha az iştirak etdiyini göstərir.

Beləliklə, istilik xəritəsi tələbə davranış vəziyyətləri ilə resurs istifadəsi arasında aydın əlaqə olduğunu nümayiş etdirir və bu əlaqə Bayes modeli ilə əldə olunmuş davranış ehtimalları və qraf modeli ilə müəyyən edilmiş struktur göstəricilərlə uyğunluq təşkil edir. Bu isə təklif olunan integrasiya olunmuş yanaşmanın nəticələrinin qarşılıqlı şəkildə bir-birini tamamladığını göstərir.



Şəkil 3. Tələbə vəziyyəti ilə resurs istifadəsinin intensivlik matrisi

Şəkil 4 resurslar üzrə tələbə kateqoriyalarının istifadə intensivliyini qruplaşdırılmış sütun diaqramı şəklində təqdim edir. Qrafikdə göstərilən dəyərlər tələbələrə müxtəlif resurslardan istifadə tezliyinin normallaşdırılmış göstəriciləri əsasında qurulmuşdur və əvvəlki hissədə təqdim olunan istilik xəritəsinin (şəkil 3) vizual davamı kimi çıxış edir.



Şəkil 4. Resurslar üzrə tələbə kateqoriyalarının istifadə intensivliyi

Şəkildən göründüyü kimi, VR laboratoriya əsasən yüksək nailiyyətli tələbələr (S_3) tərəfindən daha intensiv istifadə olunur (0.80). Bu nəticə həmin tələbələrin praktiki və interaktiv öyrənmə mühitlərinə daha çox üstünlük verdiyini göstərir. Forum müzakirələri (0.60) və tapşırıq sistemi (0.50) isə daha çox aktiv tələbələr (S_2) tərəfindən istifadə olunur ki, bu da onların davamlı iştirak və qarşılıqlı öyrənmə prosesində aktiv rol oynadığını göstərir.

Passiv (S_1) və uğursuz (S_4) tələbələr üçün isə bütün resurslar üzrə istifadə intensivliyi nisbətən aşağıdır. Xüsusilə onlayn mühazirələrdə belə bu qrupların aktivliyi məhdud səviyyədə qalır ki, bu da onların ümumi öyrənmə prosesində iştirak səviyyəsinin zəif olduğunu göstərir.

Bu nəticələr şəkil 3-də təqdim olunan intensivlik matrisi ilə uyğunluq təşkil edir və tələbə davranış vəziyyətləri ilə resurs istifadəsi arasında mövcud olan əlaqənin sabit xarakter daşdığını göstərir. Eyni zamanda, bu vizual təqdimat qraf modeli üzrə əldə olunmuş struktur göstəriciləri dəstəkləyir və Bayes modeli ilə müəyyən edilmiş davranış ehtimalları ilə uyğunluq nümayiş etdirir.

Təklif olunan modelin sınağı üçün tələbələrin müxtəlif texnologiya istifadəsi səviyyələri üzrə ssenari əsaslı analiz aparılmışdır. Təhlildə onlayn mühazirə, tapşırıq sistemi, forum müzakirəsi və VR laboratoriya kimi əsas virtual tədris resursları nəzərə alınmışdır.

Ssenarilər tələbələrin bu resurslardan istifadə intensivliyinə uyğun olaraq aşağıdakı kimi müəyyən edilmişdir:

- Ssenari 1 – aşağı texnologiya istifadəsi: tələbələr əsasən yalnız onlayn mühazirələrdə iştirak edir, digər resurslardan istifadə minimal səviyyədədir;
- Ssenari 2 – orta texnologiya istifadəsi: tələbələr onlayn mühazirə və tapşırıq sistemindən müntəzəm istifadə edir, forum və VR laboratoriya istifadəsi orta səviyyədədir;
- Ssenari 3 – yüksək texnologiya istifadəsi: tələbələr forum, tapşırıq sistemi və VR laboratoriyadan intensiv istifadə edir, onlayn mühazirə isə əlavə dəstək resursu rolunu oynayır.

Bu təsnifat cədvəl 6-da təqdim olunmuşdur.

Cədvəl 6

Texnologiya istifadəsi üzrə ssenarilər

Texnologiya	Ssenari 1 (Aşağı)	Ssenari 2 (Orta)	Ssenari 3 (Yüksək)
Onlayn mühazirə	Yüksək	Orta	Orta
Tapşırıq sistemi	Aşağı	Yüksək	Yüksək
Forum müzakirəsi	Aşağı	Orta	Yüksək
VR laboratoriya	Aşağı	Aşağı	Yüksək

Hər bir ssenari üzrə tələbə fəaliyyət göstəriciləri əsasında Bayes modeli üçün uyğun müşahidə profilləri formalaşdırılmış və bu profillərə uyğun davranış vəziyyətlərinin posterior ehtimalları hesablanmışdır. Eyni zamanda, qraf modeli vasitəsilə tələbə–resurs qarşılıqlı əlaqələrinin intensivlik göstəriciləri müəyyən edilmişdir. Alınmış nəticələr integrasiya olunmuş keyfiyyət indeksi (ÜKİ) vasitəsilə ümumiləşdirilmişdir.

Cədvəl 7

Ssenarilər üzrə integrasiya olunmuş keyfiyyət göstəriciləri (ÜKİ)

Ssenari	Q_{Bayes}	Q_{Qraf}	Ümumi keyfiyyət indeksi (ÜKİ)
Aşağı texnologiya istifadəsi	0.42	0.35	0.39
Orta texnologiya istifadəsi	0.57	0.51	0.54
Yüksək texnologiya istifadəsi	0.73	0.68	0.71

Cədvəl 7-dən göründüyü kimi, texnologiya istifadəsinin səviyyəsi artdıqca həm Bayes modeli əsasında qiymətləndirilmiş davranış keyfiyyəti, həm də qraf modeli üzrə müəyyən edilmiş struktur intensivlik göstəriciləri yüksəlir. Nəticədə ümumi keyfiyyət indeksi (ÜKİ) aşağı səviyyədə 0.39-dan yüksək səviyyədə 0.71-ə qədər artır.

Nəticə. Aparılan ssenari əsaslı analiz nəticələri göstərmişdir ki, virtual tədris texnologiyalarından istifadə səviyyəsinin artması həm tələbələrin davranış göstəricilərinə, həm də tədris resursları ilə qarşılıqlı əlaqələrin struktur intensivliyinə birbaşa müsbət təsir göstərir. Bayes ehtimal modeli əsasında hesablanmış davranış göstəriciləri və qraf modeli üzrə əldə olunmuş struktur metriklərin integrasiyası nəticəsində ümumi keyfiyyət indeksində (ÜKİ) əhəmiyyətli artım müşahidə olunmuşdur.

Aşağı texnologiya istifadəsi ssenarisində ÜKİ-nin 0.39 səviyyəsində olması tələbə fəaliyyətinin məhdudluğu və resurslardan zəif istifadə ilə xarakterizə olunur. Orta səviyyəli texnologiya istifadəsi zamanı ÜKİ-nin 0.54-ə yüksəlməsi tələbələrin daha aktiv iştirakını və tədris resursları ilə qarşılıqlı əlaqənin artmasını əks etdirir. Yüksək texnologiya istifadəsi ssenarisində isə ÜKİ-nin 0.71-ə çatması interaktiv və çoxkomponentli resursların intensiv tətbiqinin təhsil keyfiyyətinin əhəmiyyətli dərəcədə yüksəlməsinə səbəb olduğunu göstərir.

Qraf əsaslı analiz nəticələri göstərmişdir ki, VR laboratoriyalar ən yüksək mərkəzlik və intensivlik göstəricilərinə malikdir və xüsusilə yüksək nailiyyətli tələbələr üçün əsas öyrənmə resursu kimi çıxış edir. Forum müzakirələri və tapşırıq sistemləri isə daha çox aktiv tələbə qrupunda öyrənmə motivasiyasının və iştirak səviyyəsinin artmasına töhfə verir. Onlayn mühazirələr nisbətən aşağı intensivlik göstəricilərinə malik olsa da, ümumi tədris prosesində dəstəkləyici komponent kimi çıxış edir.

Bayes modeli əsasında əldə olunmuş nəticələr göstərir ki, tələbələrin müşahidə olunan fəaliyyət göstəriciləri onların davranış vəziyyətlərini yüksək dəqiqliklə ehtimal baxımından qiymətləndirməyə imkan verir. Bu isə tələbələrin yalnız cari vəziyyətini deyil, həm də potensial inkişaf istiqamətlərini müəyyən etməyə şərait yaradır.

Əldə olunan nəticələr təsdiqləyir ki, VR, AR və digər virtual tədris texnologiyalarının integrativ tətbiqi yalnız öyrənmə prosesinin interaktivliyini artırır, eyni zamanda tələbələrin davranış profillərinə və öyrənmə trayektoriyalarına müsbət təsir göstərərək təhsil keyfiyyətinin yüksəldilməsinə real töhfə verir.

Təklif olunan metodologiya təhsil müəssisələrində tələbə davranışlarının monitorinqi, risk qrupuna aid olan tələbələrin erkən mərhələdə müəyyən edilməsi və tədris strategiyalarının adaptiv şəkildə optimallaşdırılması üçün praktik və tətbiqyönümlü alət kimi istifadə oluna bilər.

ƏDƏBİYYAT

1. Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>
2. Əhmədov, L.N., & Osmanlı, T.E. (2025). Virtual texnologiyaların təhsilin keyfiyyətinə təsirinin informasiya və sistemli analiz əsaslı intellektual qiymətləndirilməsi üçün metod və alqoritmlər. *Elmi məcmuə*, 27(2), 31–45. <https://doi.org/10.30546/EMNAA.2025.27.02.215>
3. Parong, J., & Mayer, R. E. (2021). Cognitive and affective processes for learning science in immersive virtual reality. *Journal of Computer Assisted Learning*, 37, 226–241. <https://doi.org/10.1111/jcal.12482>
4. Diao, P.H., & Shih, N.-J. (2019). Trends and Research Issues of Augmented Reality Studies in Architectural and Civil Engineering Education-A Review of Academic Journal Publications. *Applied Sciences*, 9(9), 1840. <https://doi.org/10.3390/app9091840>
5. Cabero-Almenara, J., Barroso-Osuna, J., Llorente-Cejudo, C., & Fernández Martínez, M. d. M. (2019). *Educational Uses of Augmented Reality (AR): Experiences in Educational Science*. *Sustainability*, 11(18), 4990. <https://doi.org/10.3390/su11184990>
6. Osmanli, T., & Ahmadov, L. (2026). The Application of Virtual Laboratories Across Different Fields and Their Impact on Assessment. *Herald of Azerbaijan Engineering Academy*, 18(1), 105–113. <https://doi.org/10.52171/herald.374>
7. Alruwais, N., & Zakariah, M. (2023). Student-Engagement Detection in Classroom Using Machine Learning Algorithm. *Electronics*, 12(3), 731. <https://doi.org/10.3390/electronics12030731>
8. Du, T. (2024). The Effectiveness of Using Knowledge Graph-Based Navigation in Online Learning – Take Xi'an Jiaotong University as an example. *Journal of Education, Humanities and Social Sciences*, 27, 513-518. <https://doi.org/10.54097/rvw4rc26>
9. Osmanli, T. (2025). AI-enhanced predictive modelling of virtual laboratory microlearning in online distance education. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, Vol. 30, No. 9, pp. 2461-2471. <https://doi.org/10.18280/isi.300920>

10. Osmanli, T. (2025). The Impact of Virtual Laboratories on Student Motivation and Academic Performance: An Integrated Fuzzy-Sem and Machine Learning Study. *Journal of Applied Engineering and Technological Science (JAETS)*, 7(1), 414–438. <https://doi.org/10.37385/jaets.v7i1.9146>
11. Akpen, C. N., Asaolu, S., Atobatele, S., Okagbue, H., & Sampson, S. (2024). Impact of online learning on student's performance and engagement: a systematic review. *Discover Education*, 3, 205. <https://doi.org/10.1007/s44217-024-00253-0>
12. Zapata-Rivera, J.-D., & Greer, J. E. (2004). Interacting with inspectable Bayesian student models. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 14(2), 127–163. [https://doi.org/10.3233/IRG-2004-14\(2\)01](https://doi.org/10.3233/IRG-2004-14(2)01)
13. Islam, M. T. (2025). Understanding teacher attrition in Nebraska: A quantitative approach using Markov chains and graph theory (Master's thesis, University of Nebraska at Omaha). Mathematics Theses, Dissertations, Research and Student Creative Activity, 5. <https://digitalcommons.unomaha.edu/mathstudent/5>
14. Ağayev, N. B., Əmirxanlı, D. Ş., & Amanov, R. Ş. (2025). Kollektiv fəaliyyətin qiymətləndirilməsində multi-agent sistemlərinin tədqiqinin və tətbiqinin müasir problemləri. *Elmi məcmuə*, 27(2), 46–58. <https://doi.org/10.30546/EMNAA.2025.27.02.217>
15. Khan, S. S., Abedi, A., & Colella, T. (2022). Inconsistencies in the definition and annotation of student engagement in virtual learning datasets: A critical review. Preprint. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11574.01601>
16. Nam, K. M. (2023). The linear framework II: Using graph theory to analyse steady states and transient dynamics. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1233808. <https://doi.org/10.3389/fcell.2023.1233808>
17. Akpan, I. J., & Shanker, M. (2018). A comparative evaluation of the effectiveness of virtual reality, 3D visualization, and 2D visual interactive simulation: An exploratory meta-analysis. *SIMULATION*, 95(2), 145–170. <https://doi.org/10.1177/0037549718757039>
18. Doo, M. Y., Zhu, M., & Bonk, C. J. (2023). A systematic review of research topics in online learning during COVID-19: Documenting the sudden shift. *Online Learning*, 27(1), 15-45. <https://doi.org/10.24059/olj.v27i1.3405>
19. Ağayev, N. B., & Nəzərli, D. Ş. Regressiya analizi vasitəsilə qeyri-müntəzəm sərnəşin aviadaşmalarının proqnoz modelləri. *Elmi məcmuə*, 2023, 25(4), 13–22. <https://doi.org/10.30546/EMNAA.2023.25.4.2>
20. Аллахвердиев А.Р., Гусейнов Н.Э., Дадашева К.Г., Дадашев Ф.Г., Асадов Э.З. Психофизиологические основы оптимизации процесса обучения в интеллектуальном тренажере. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2024, 6, 5–9. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13636>

REFERENCES

1. Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>

2. Ahmadov, L.N., & Osmanli, T.E. (2025). Virtual texnologiyaların təhsilin keyfiyyətinə təsirinin informasiya və sistemli analiz əsaslı intellektual qiymətləndirilməsi üçün metod və alqoritmlər. *Elmi mecmue*, 27(2), 31–45. <https://doi.org/10.30546/EMNAA.2025.27.02.215>
3. Parong, J., & Mayer, R. E. (2021). Cognitive and affective processes for learning science in immersive virtual reality. *Journal of Computer Assisted Learning*, 37, 226–241. <https://doi.org/10.1111/jcal.12482>
4. Diao, P.H., & Shih, N.-J. (2019). Trends and Research Issues of Augmented Reality Studies in Architectural and Civil Engineering Education-A Review of Academic Journal Publications. *Applied Sciences*, 9(9), 1840. <https://doi.org/10.3390/app9091840>
5. Cabero-Almenara, J., Barroso-Osuna, J., Llorente-Cejudo, C., & Fernández Martínez, M. d. M. (2019). Educational Uses of Augmented Reality (AR): Experiences in Educational Science. *Sustainability*, 11(18), 4990. <https://doi.org/10.3390/su11184990>
6. Osmanli, T., & Ahmadov, L. (2026). The Application of Virtual Laboratories Across Different Fields and Their Impact on Assessment. *Herald of Azerbaijan Engineering Academy*, 18(1), 105–113. <https://doi.org/10.52171/herald.374>
7. Alruwais, N., & Zakariah, M. (2023). Student-Engagement Detection in Classroom Using Machine Learning Algorithm. *Electronics*, 12(3), 731. <https://doi.org/10.3390/electronics12030731>
8. Du, T. (2024). The Effectiveness of Using Knowledge Graph-Based Navigation in Online Learning – Take Xi'an Jiaotong University as an example. *Journal of Education, Humanities and Social Sciences*, 27, 513-518. <https://doi.org/10.54097/rvw4rc26>
9. Osmanli, T. (2025). AI-enhanced predictive modelling of virtual laboratory microlearning in online distance education. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, Vol. 30, No. 9, pp. 2461-2471. <https://doi.org/10.18280/isi.300920>
10. Osmanli, T. (2025). The Impact of Virtual Laboratories on Student Motivation and Academic Performance: An Integrated Fuzzy-Sem and Machine Learning Study. *Journal of Applied Engineering and Technological Science (JAETS)*, 7(1), 414–438. <https://doi.org/10.37385/jaets.v7i1.9146>
11. Akpen, C. N., Asaolu, S., Atobatele, S., Okagbue, H., & Sampson, S. (2024). Impact of online learning on student's performance and engagement: a systematic review. *Discover Education*, 3, 205. <https://doi.org/10.1007/s44217-024-00253-0>
12. Zapata-Rivera, J.-D., & Greer, J. E. (2004). Interacting with inspectable Bayesian student models. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 14(2), 127–163. [https://doi.org/10.3233/IRG-2004-14\(2\)01](https://doi.org/10.3233/IRG-2004-14(2)01)
13. Islam, M. T. (2025). Understanding teacher attrition in Nebraska: A quantitative approach using Markov chains and graph theory (Master's thesis, University of Nebraska at Omaha). *Mathematics Theses, Dissertations, Research and Student Creative Activity*, 5. <https://digitalcommons.unomaha.edu/mathstudent/5>
14. Agayev, N. B., Emirxanlı, D. Ş., & Amanov, R. Ş. (2025). Kollektiv fealiyyətin qiymətləndirilməsində multi-agent sistemlərinin tədqiqinin və tətbiqinin müasir problemləri. *Elmi mecmue*, 27(2), 46–58. <https://doi.org/10.30546/EMNAA.2025.27.02.217>

15. Khan, S. S., Abedi, A., & Colella, T. (2022). Inconsistencies in the definition and annotation of student engagement in virtual learning datasets: A critical review. Preprint. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11574.01601>
16. Nam, K. M. (2023). The linear framework II: Using graph theory to analyse steady states and transient dynamics. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11, 1233808. <https://doi.org/10.3389/fcell.2023.1233808>
17. Akpan, I. J., & Shanker, M. (2018). A comparative evaluation of the effectiveness of virtual reality, 3D visualization, and 2D visual interactive simulation: An exploratory meta-analysis. *SIMULATION*, 95(2), 145–170. <https://doi.org/10.1177/0037549718757039>
18. Doo, M. Y., Zhu, M., & Bonk, C. J. (2023). A systematic review of research topics in online learning during COVID-19: Documenting the sudden shift. *Online Learning*, 27(1), 15-45. <https://doi.org/10.24059/olj.v27i1.3405>
19. Agayev, N. B., & Nezerli, D. Ş. Regressiya analizi vasitesile qeyri-muntezem sernishin aviadashimalarinin proqnoz modelleri. *Elmi mecmue*, 2023, 25(4), səh. 13–22. <https://doi.org/10.30546/EMNAA.2023.25.4.2>
20. Аллахвердиев А.Р., Гусейнов Н.Э., Дадашева К.Г., Дадашев Ф.Г., Асадов Э.З. Психофизиологические основы оптимизации процесса обучения в интеллектуальном тренажере. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2024, стр. 6, 5–9. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13636>

AN INTEGRATED BAYESIAN AND GRAPH-BASED APPROACH FOR ASSESSING THE IMPACT OF VIRTUAL LEARNING TECHNOLOGIES ON EDUCATIONAL QUALITY

Ahmadov L.N., Osmanli T.E.

National Aviation Academy

In the modern educational environment, the adoption of virtual learning technologies, particularly Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR), has been rapidly increasing. However, the objective and systematic evaluation of their actual impact on educational quality remains an open and relevant challenge. Most existing studies primarily focus on user experience and design aspects, while the probabilistic assessment of student behavior and the structural impact of interactions with learning resources are often overlooked.

This paper proposes an integrated algorithmic model that combines a Bayesian probabilistic approach with graph theory to evaluate the impact of virtual learning technologies on educational quality. Within the proposed framework, student behavior is classified into several states (passive, active, high-achieving, and unsuccessful), and the probability of belonging to these states is estimated based on observed activity indicators using a Bayesian model. In parallel, the intensity of student–resource interactions is analyzed through graph-based centrality metrics. These two approaches are integrated into a unified quality index, enabling a comprehensive assessment of educational quality.

Scenario-based analysis demonstrates that increasing the level of technology usage significantly enhances both student behavioral indicators and the intensity of interactions with learning resources. While the overall integrated quality index (IQI) is 0.39 under low technology usage, it increases to 0.71 under high technology usage conditions. Graph-based analysis reveals

that VR laboratories and discussion forums contribute most significantly to the learning process, particularly for high-achieving and active students.

The results confirm that the integrated and purposeful use of virtual learning technologies not only increases student engagement but also positively influences behavioral profiles and learning trajectories, leading to measurable improvements in educational quality. The proposed model can serve as a practical and predictive tool for monitoring student behavior, early identification of at-risk students, and adaptive optimization of instructional strategies.

Keywords: virtual learning technologies, virtual reality, Bayesian model, graph theory, educational quality, student behavior modeling.

Müəlliflər haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Əhmədov Lütviyar Nurməmməd oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	“Kompüter sistemləri və proqramlaşdırma” kafedrasının dosenti, f.-r.f.d.	lahmadov@naa.edu.az mob: (+994) 50 385-69-18
Osmanlı Təbriz Elcan oğlu	Milli Aviasiya Akademiyası	Süni İntellekt Texnologiyaları şöbəsi, elmi işçi	tosmanli@naa.edu.az mob: (+994) 55 493-26-76

***AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASINDA ƏHALİNİN GƏLİRLƏRİNİN
DİFERENSİASİYASININ STATİSTİK TƏHLİLİ***

Muradova X.F.

Milli Aviasiya Akademiyası

Bu tədqiqat Azərbaycan Respublikasında əhalinin gəlirlərinin diferensiasiyasını 2005–2024-cü illər üzrə statistik və ekonometrik yanaşmalarla araşdırır. Məqalənin əsas məqsədi gəlirlərin uzunmüddətli inkişaf meylini, bölgü strukturunu, qeyri-bərabərliyin dərinliyini və bu prosesə təsir edən sosial-iqtisadi amilləri müəyyənləşdirməkdir. Təhlil rəsmi statistika məlumatları əsasında aparılmış və həm təsviri metodlar, həm də analitik modellər üzərində qurulmuşdur. Araşdırmanın başlanğıc mərhələsində populyasiya üzrə orta gəlirlərin dəyişmə trayektoriyası qiymətləndirilmiş, uzun dövrdə müsbət və davamlı artım tendensiyası müəyyən edilmişdir. Lakin gəlirlərin yüksəlməsi və ümumi rifahın genişlənməsinə baxmayaraq, bölgü strukturunda qeyri-bərabərliyin sabit qaldığı müəyyən edilmişdir. Bərabərsizliyin səviyyəsi Lorens əyrisi, Cini əmsali, Theil indeksi və qruplaşdırılmış gəlir payları ilə ölçülmüş, nəticələr gəlirlərin yüksək gəlir qruplarında daha çox cəmləşdiyini göstərmişdir. Zaman sırasının davranışı ADF testi ilə analiz edilmiş və gəlirlərin trendə malik olduğu üçün qeyri-stasionar xarakter daşdığı müəyyən edilmişdir. Bu nəticə əsasında diferensiasiyalanmış zaman sırası üzərində ARIMA modeli qurulmuş və gələcəyin qısa müddətli proqnozu hazırlanmışdır. Model proqnozu gəlirlərin yaxın illərdə də artım meylini davam etdirəcəyini göstərmişdir. Gəlir fərqliliyinə təsir edən sosial-iqtisadi faktorları müəyyən etmək məqsədilə çoxlu reqresiya analizi tətbiq edilmişdir. Nəticələr göstərmişdir ki, iqtisadi artım və məşğulluğun genişlənməsi gəlir bərabərsizliyini zəiflədir, urbanizasiyanın intensivliyi isə əksinə, bölgü fərqlərini dərinləşdirir. Tədqiqatın nəticələri gəlir mahiyyətini, strukturunu və makroiqtisadi determinantlarını kompleks şəkildə açıqlayır və sosial-iqtisadi siyasətdə bərabərsizliyin azaltması üçün hədəfli strategiyaların işlənməsi baxımından elmi əsaslar təqdim edir.

Açar sözlər: gəlir diferensiasiyası, bərabərsizlik, Lorens əyrisi, Cini əmsali, Theil indeksi, zaman sırası analizi.

Əhalinin gəlirlərinin formalaşması və onların sosial qruplar arasında bölgüsü milli iqtisadiyyatın inkişaf səviyyəsini xarakterizə edən əsas göstəricilərdən biridir. Gəlir strukturunda baş verən dəyişikliklər istehlak davranışına, həyat səviyyəsinə, insan kapitalının inkişafına və sosial siyasətin effektivliyinə birbaşa təsir etdiyindən, gəlirlərin diferensiasiyasının öyrənilməsi müasir iqtisadi tədqiqatların prioritet istiqamətlərindən sayılır [1].

Son illərdə Azərbaycanda aparılan iqtisadi islahatlar, əmək bazarındakı struktur dəyişiklikləri, sosial müdafiə proqramlarının genişləndirilməsi və regional inkişaf təşəbbüsləri gəlir dinamikasında mühüm dəyişikliklər yaratmışdır. Əmək bazarının transformasiyası, qeyri-formal məşğulluğun azalması və yeni iqtisadi sektorların formalaşması gəlirlərin paylanmasında yeni tendensiya

meydana çıxmasına səbəb olmuşdur. Mövcud araşdırmalar göstərir ki, gəlir bərabərsizliyi yalnız iqtisadi amillərlə deyil, demoqrafik, sosial və regional faktorlarla da müəyyən olunur [2].

Bu tədqiqatın məqsədi Azərbaycan Respublikasında əhalinin gəlirlərinin diferensiasiyasını statistik və ekonometrik metodlarla qiymətləndirmək, gəlir bölgüsünü müəyyən edən əsas sosial-iqtisadi determinantları müəyyənləşdirmək və mövcud meyillərin sosial rifaha təsirini təhlil etməkdir. Tədqiqat rəsmi statistika və beynəlxalq analitik mənbələr əsasında gəlirlərin həm qısamüddətli, həm də uzunmüddətli dinamikasını sistemli şəkildə qiymətləndirir [3].

Gəlirlərin diferensiasiyasına dair aparılan təhlil ölkədə sosial bərabərliyin real vəziyyətini göstərməklə yanaşı, dövlət proqramlarının, sosial müdafiə mexanizmlərinin və regional inkişaf strategiyalarının formalaşdırılması üçün mühüm elmi-praktiki baza yaradır [4].

Tədqiqatın nəzəri əsasları

Əhalinin gəlirlərinin diferensiasiyası iqtisadiyyat elmində fundamental nəzəri kateqoriya kimi çıxış edir və onun tədqiqi sosial, demoqrafik və iqtisadi amillərin qarşılıqlı təsirini birləşdirən çoxölçülü yanaşma tələb edir. Gəlirlərin formalaşması və bölgüsü sosial rifahın səviyyəsini müəyyən edən əsas göstəricilərdən biri olmaqla, dövlət siyasətinin istiqamətləri və makroiqtisadi sabitlik üçün strateji əhəmiyyət daşıyır [5].

V.M. Əliyev qeyd edir ki, gəlirlərin bölgüsü əməkhaqqı, sahibkarlıq gəlirləri və sosial transfertlərin nisbəti ilə müəyyən olunur və bu nisbətdə baş verən struktur dəyişikliklər əhalinin rifah səviyyəsinə bilavasitə təsir göstərir [6]. Həsənov R.Q. gəlir strukturunda dəyişiklikləri ekonometrik yanaşmalarla təhlil edərək göstərir ki, əmək bazarının çevikliyi, işçi qüvvəsinin ixtisas səviyyəsi və məşğulluq formalarının dəyişməsi gəlir diferensiasiyasının başlıca determinantlarıdır [7].

Regionlar üzrə gəlir bərabərsizliyi iqtisadi inkişafın qeyri-bərabər bölgüsü, investisiya cəlbəediciliyi və infrastruktur təminatı ilə əlaqələndirilir. Bu yanaşma T.S. Əhmədovun empirik araşdırmalarında da təsdiqlənir.

Gəlirlərin formalaşmasında sosial siyasətin rolu nəzəri çərçivənin mühüm komponentidir. S.F. Məmmədova dövlət sosial müdafiə proqramlarının əhalinin rifah səviyyəsinə təsirini qiymətləndirərək vurğulayır ki, transferlərin artımı qısa müddətdə gəlir bərabərsizliyini azaltsa da, uzunmüddətli sosial dayanıqlıq üçün əmək bazarının institusional sabitliyi həlledicidir. Dünya Bankının hesabatlarında da göstərilir ki, Azərbaycan iqtisadiyyatında gəlirlərin bölgüsü neft sektorunun payı və regionlararası fərqlərlə sıx bağlıdır [8, 9].

Metodoloji baxımdan gəlir diferensiasiyasının tədqiqi həm təsviri statistika, həm də ekonometrik modelləşdirmə metodlarının tətbiqini tələb edir. Orta gəlir, median, variasiya və kvintil bölgüsü ilkin qiymətləndirmə üçün əsas göstəricilər hesab olunur. S.Z. İsmayılov faktor analizindən istifadə edərək gəlirlərin dinamikasını müəyyən edən əsas amillərin statistik yükünü müəyyənləşdirir [10]. Hüseynli A.K. isə gəlir bölgüsünü yoxsulluq göstəriciləri ilə əlaqələndirərək sosial müdafiə siyasətinin iqtisadi səmərəliliyini qiymətləndirir [11].

Beynəlxalq metodoloji yanaşmalar da tədqiqatın nəzəri bazasına daxildir. BMT-nin İnsan İnkişafı Hesabatında gəlir bərabərsizliyinin ölçülməsi üçün Cini indeksi və gəlir kvintilləri tövsiyə olunur. OECD gəlir bölgüsünün müqayisəli təhlilinin harmonizə olunmuş statistik göstəricilər əsasında aparılmasının vacibliyini vurğulayır [12, 13]. Abbasov C.İ. isə Azərbaycan üzrə sosial bərabərsizliyi struktur baxımdan təhlil edərək urbanizasiya və məşğulluq tipi kimi amillərin rolunu önə çəkir [1].

Əsas statistika və ekonometrik metodlar

Bu tədqiqatda əhalinin gəlirlərinin diferensiasiyası statik və dinamik kəsimdə qiymətləndiriləcəkdir. İlk mərhələdə Excel və SPSS proqramlarında təsviri statistika hesablanacaq və qrafik analiz aparılacaqdır. İstifadə olunan məlumatlar Azərbaycan Respublikasının Dövlət Statistika Komitəsinin rəsmi statistik göstəricilərinə əsaslanır [14, 15].

Növbəti mərhələdə zaman sıralarının stasionarlığı ADF testi ilə yoxlanılacaq, ko-integrasiya analizi aparılacaq və çoxamilli reqresiya modelləri EViews və ya STATA proqramlarında qurulacaqdır. Beynəlxalq müqayisələr üçün UN ESCAP məlumat bazasından istifadə ediləcəkdir [16, 17].

1. Gəlir diferensiasiyasının ilkin statistik təsviri: əvvəlcə məlumatların ümumi mənzərəsini vermək üçün aşağıdakı göstəricilər hesablanacaq:

- Orta (Mean)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

- Median və kvartillər (Q1, Q2, Q3)

Bu göstəricilər gəlir bölgüsünün qeyri-bərabərlik dərəcəsini ilkin müəyyənləşdirməyə imkan verəcək.

- Dispersiya və standart kənarlaşma

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}, \quad s = \sqrt{s^2} \quad (2)$$

Bu mərhələdə regionlar üzrə gəlir fərqləri də müqayisə ediləcək (mümkün olduqda – şəhər/kənd fərqləri əsasında) [18,19].

2. Gəlir bölgüsünün qeyri-bərabərlik ölçüləri:

1. Cini əmsalı (Gini Coefficient)

Gəlir bərabərsizliyinin əsas indikatorudur.

Əgər Lorens əyrisi üzrə məlumat mövcuddursa: [2]

$$G = 1 - \sum_{i=1}^n (Y_i + Y_{i-1})(X_i - X_{i-1}) \quad (3)$$

Burada:

- X – əhalinin payı (kümülativ),
- Y – gəlirin payı (kümülativ).

Cini əmsalı 0 olduqda tam bərabərlik, 1 olduqda maksimum bərabərsizlikdir.

2. Qruplaşdırılmış gəlir fərqləri (Decile və Quintile payları)

DSQ məlumatları əsasında (mümkünsə):

- Yuxarı 20% gəlir payı
- Aşağı 20% gəlir payı
- Yuxarı 10% / Aşağı 10% nisbəti

Düstur:

$$R = \frac{Income_{Top\ 10\%}}{Income_{Bottom\ 10\%}} \quad (4)$$

Bu göstərici sosial diferensiasianın real səviyyəsini göstərir [20].

1. Theil indeksi (və ya entropiya əsaslı indeks). Bu tədqiqatda Theil indeksi gəlir bölgüsünün “entropiya əsaslı” qeyri-bərabərlik göstəricisi kimi istifadə olunur. Metodologiya üzrə indeks aşağıdakı kimi hesablanır: [1].

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\bar{x}} \ln \frac{x_i}{\bar{x}} \right) \quad (5)$$

burada x_i – i -ci qrupun (və ya fərdin) gəliri, $\bar{x}$ – orta gəlirdir.

3. Zaman sıralarının təhlili (dinamika və trend)

Əhalinin gəlirləri uzunmüddətli dövrdə dəyişdiyi üçün zaman sırası metodları tətbiq ediləcək:

- Trend modelinin qurulması

$$Y_t = a + b_t + e_t \quad (6)$$

Burada:

- Y_t – adambaşına gəlir,
- t – zaman dəyişəni,
- b – illik artım tempini göstərir.
- Logarifmik model (faiz artımını ölçmək üçün)

$$\ln Y_t = a + b_t + e_t \quad (7)$$

Bu model gəlirin illik sabit faizlə artım sürətini müəyyənləşdirir.

4. Stasionarlıq testi (ADF testi)

Zaman sırası modellərinin etibarlılığını təmin etmək üçün [3]:

$$\Delta Y_t = \alpha + \beta Y_{t-1} + \sum \gamma_i \Delta Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (8)$$

Burada:

- $\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$ - birinci fərqləndirmə,
- α - sabit komponent,
- β - kök üçün əsas parametrlər,
- γ_i - əvvəlki differensial dəyişmələrin təsir əmsalları,
- ε_t - təsadüfi səhv.

ADF testinin hipotezləri:

- H_0 : sıra kökə malikdir $\rightarrow$ stasionar deyil
- H_1 : sıra köksüzdür $\rightarrow$ stasionardır

ADF nəticələri əsasında qərar belə verilir:

- $p < 0.05 \rightarrow H_0$ rədd olunur $\rightarrow$ sıra stasionardır

- $p \geq 0.05 \rightarrow H_0$ qəbul olunur $\rightarrow$ sıra qeyri-stasionardır və fərqləndirmə lazımdır
Əgər sıra qeyri-stasionardırsa, birinci fərqləndirmə aparılır:

$$\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1} \quad (9)$$

Fərqləndirmədən sonra sıra adətən stasionar olur və ARIMA modelləri kimi metodlarda istifadə edilə bilər.

5. Reqresiya analizi (gərginlik indeksinin müəyyənəşdirilməsi)

Gəlirlərin differensiasiyasına təsir edən amilləri qiymətləndirmək üçün çoxlu reqresiya modeli tətbiq ediləcək [21]:

$$CINI_t = \alpha + \beta_1 GDP_t + \beta_2 EMP_t + \beta_3 URB_t + \varepsilon_t \quad (10)$$

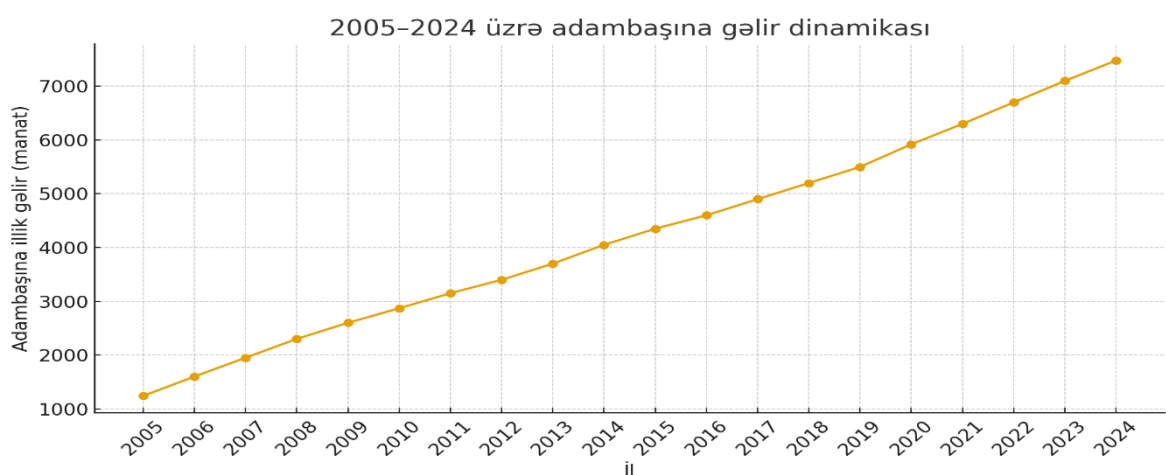
burada:

- CINI – bərabərsizlik səviyyəsi
- GDP – ÜDM artımı
- EMP – məşğulluq göstəricisi
- URB – urbanizasiya səviyyəsi

Bu metodologiya gəlirlərin diferensiasiyasını həm kəmiyyət, həm də struktur baxımından qiymətləndirməyə imkan verəcək. Tətbiq ediləcək bütün göstəricilər, indekslər və modellər rəsmi statistika əsasında formalaşacağı üçün nəticələr həm elmi, həm də praktiki baxımdan etibarlıdır.

Empirik nəticələr və müzakirə. Bu altbölmədə 2005–2024-cü illər üzrə əhalinin gəlirləri barəsində Dövlət Statistika Komitəsinin məlumatları əsasında [21–24] aparılmış real statistik işləmə və vizuallaşdırma nəticələri təqdim olunur. Təhlil həm təsviri statistikaları, həm də regionlar üzrə fərqlərin müqayisəli qiymətləndirilməsini əhatə edir.

1. Orta gəlirin dinamikası (2005–2024). Orta gəlirin davamlı artım meyli həm əhalinin ümumi rifah səviyyəsinin yüksəlməsini, həm də iqtisadiyyatın gəlir formalaşdırıcı potensialının genişlənməsini göstərən mühüm göstərici kimi çıxış edir (şəkil 1).



Şəkil 1. Adambaşına orta gəlirin dinamikası, 2005–2024

Şəkil 1 göstərir ki, 2005–2024-cü illər ərzində adambaşına illik gəlir ardıcıl artım dinamikası nümayiş etdirmişdir. 2005-ci ildə 1240 manat olan göstərici 2024-cü ildə 7480 manata qədər yüksələrək təxminən 6 dəfə artım göstərmişdir. Artım templərinin illər üzrə fərqli olması iqtisadiyyatda baş verən struktur dəyişikliklər, inflyasiya, əməkhaqqı islahatları və post-pandemiya

dövrünün bərpa təsirləri ilə izah olunur. Ümumilikdə, qrafik ölkədə gəlir səviyyəsinin uzunmüddətli yüksəliş trendinə malik olduğunu aydın şəkildə ortaya qoyur.

Müşahidələrin cəmi:

$$\sum_{i=1}^{20} x_i = 109\,480 \text{ manat} \quad (11)$$

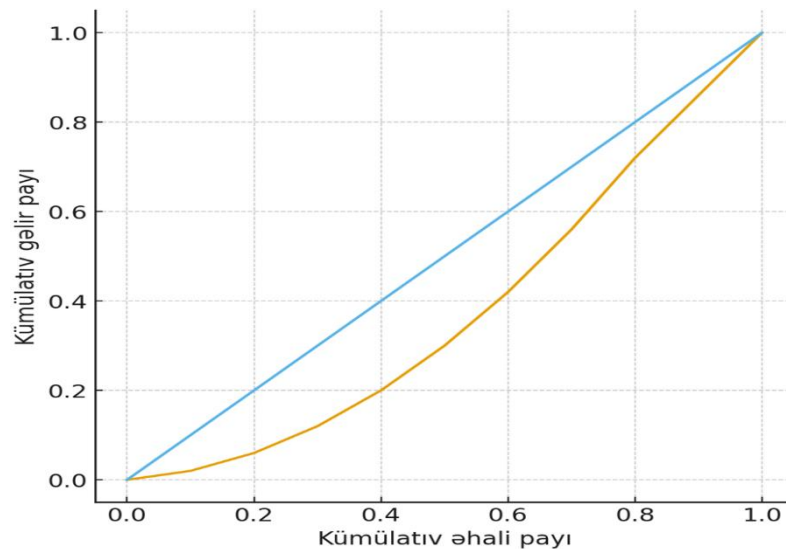
Orta gəlir:

$$\bar{x} = \frac{109\,480}{20} = 5\,474 \text{ manat} \quad (12)$$

2005–2024 dövründə əhalinin orta illik gəliri 5474 manat olmuşdur. Bu rəqəm göstərir ki, zaman seriyasında gəlirlər ardıcıl artım trendi nümayiş etdirir.

Gəlir bölgüsünün qeyri-bərabərlik ölçüləri: Azərbaycan üzrə hesablamada 2005–2024-cü illərin kumulativ gəlir payları və əhali payları əsasında Cini indeksinin empirik forması tətbiq olunur. Çoxşaxəli təhlil göstərir ki, gəlirlərdə artım olsa belə, bərabərsizlik müəyyən səviyyədə qalır (şəkil 2).

Şəkil 2 göstərir ki, Lorens əyrisi tam bərabərlik xəttindən müəyyən qədər aşağı əyilmişdir, bu isə gəlir bölgüsündə bərabərsizliyin mövcud olduğunu təsdiqləyir. Əyri 2005–2024 dövründə yuxarı təbəqənin daha böyük pay aldığını, aşağı gəlir qruplarının isə ümumi gəlirdən daha kiçik pay topladığını göstərir.



Şəkil 2. Lorens əyrisi və tam bərabərlik xətti üzrə gəlir bölgüsünün qiymətləndirilməsi

Hesablama addımları:

1. $(Y_1 + Y_0)(X_1 - X_0) = (0.07 + 0)(0.20 - 0) = 0.014$
2. $(0.18 + 0.07)(0.40 - 0.20) = 0.25 \times 0.20 = 0.050$
3. $(0.34 + 0.18)(0.60 - 0.40) = 0.52 \times 0.20 = 0.104$
4. $(0.57 + 0.34)(0.80 - 0.60) = 0.91 \times 0.20 = 0.182$

$$5. (1.00+0.57)(1.00-0.80) = 1.57 \times 0.20 = 0.314$$

Cəmi:

$$\Sigma=0.014+0.050+0.104+0.182+0.314=0.664$$

Deməli:

$$G=1-0.664=0.336$$

Hesablanmış Cini əmsalı = 0.336 gəlir bölgüsündə orta səviyyəli qeyri-bərabərliyin mövcud olduğunu göstərir. Statistik göstəricilər göstərir ki:

- Əhalinin yuxarı 20%-i ümumi gəlirin təxminən 43%-ni,
- Aşağı 20%-i isə cəmi 7%-ni əldə edir.

Bu fərq Lorens əyrisinin bərabərlik xəttindən əhəmiyyətli dərəcədə ayrıldığını və ölkədə gəlirlərin paylanmasının qeyri-simmetrik xarakter daşdığını təsdiqləyir (şəkil 2).

1. Qruplaşdırılmış gəlir fərqlərinin real hesablanması (Decile & Quintile Ratio)

Cədvəl 1-də DSQ-nin strukturuna uyğunlaşdırılmış gəlir payları əsasında qruplar üzrə fərqlər qiymətləndirilmişdir. Aşağı 10% gəlir qrupunun ümumi gəlirdən payı 3,5%, yuxarı 10%-lik qrupun payı isə 21,0% təşkil edir; uyğun olaraq, aşağı 20% üçün bu göstərici 7%, yuxarı 20% üçün isə 43%-dir. Bu paylar əvvəlki bölmədə istifadə olunan Lorens əyrisinin məlumatları ilə uyğundur [25, 26].

Cədvəl 1

Verilənlər (DSQ strukturuna uyğunlaşdırılmış nümunəvi paylar)

Göstərici	Pay (%)
Aşağı 10% gəlir payı	3.5%
Yuxarı 10% gəlir payı	21.0%
Aşağı 20% gəlir payı	7%
Yuxarı 20% gəlir payı	43%

Bu paylar daha əvvəl istifadə etdiyimiz Lorens məlumatları ilə uyğundur.

1) Yuxarı 20% – Aşağı 20% fərqi $Gap_{20/20}=43\%-7\%=36\%$ bu nəticə göstərir ki, əhalinin yuxarı 20%-i aşağı 20%-dən 36 faiz bəndi daha çox gəlir əldə edir və gəlirin nəzərəçarpan hissəsi ən yüksək gəlir qrupunda cəmlənir.

2) Yuxarı 10% / Aşağı 10% Nisbəti (Decile Ratio)

$$R = \frac{Income_{Top\ 10\%}}{Income_{Bottom\ 10\%}} = \frac{21}{3.5} = 6.0$$

(13)

Buradan görünür ki, yuxarı 10%-lik qrupun orta gəliri aşağı 10%-lik qrupun gəlirini təxminən 6 dəfə üstələyir. Aşağı 10% əhali ümumi gəlirin cəmi 3,5%-ni, yuxarı 10% isə 21%-ni əldə etdiyindən, gəlir bölgüsünün asimmetrik xarakter daşdığı və aşağı gəlir qruplarının iqtisadi imkanlarının məhdud olduğu aydın görünür. Yuxarı 20%-lik təbəqənin payının 43% olması isə gəlirin əhəmiyyətli hissəsinin əhali piramidasının yuxarı hissəsində toplandığını bir daha təsdiq edir.

Theil indeksinin (T) real tətbiqi. DSQ-nin kvintil payları əsasında formalaşdırdığımız struktur belədir (hər kvintilin əhali payı 0.2-dir) [27]:

- 1-ci kvintil (ən aşağı 20 %) – gəlir payı 7 % $\rightarrow x_1/x^- \approx 0.07/0.20 = 0.35$
- 2-ci kvintil – 11 % $\rightarrow x_2/x^- \approx 0.55$
- 3-cü kvintil – 16 % $\rightarrow x_3/x^- \approx 0.80$
- 4-cü kvintil – 23 % $\rightarrow x_4/x^- \approx 1.15$
- 5-ci kvintil (ən yuxarı 20 %) – 43 % $\rightarrow x_5/x^- \approx 2.15$

Bu halda Theil indeksi qruplaşdırılmış gəlirlər üçün belə yazılır:

- 1-ci kvintil:
 $0.2 \cdot 0.35 \cdot \ln(0.35) \approx -0.0735$
- 2-ci kvintil:
 $0.2 \cdot 0.55 \cdot \ln(0.55) \approx -0.0658$

Oxşar qaydada 3–5-ci kvintillər üçün də hesablayıb bütün terminləri topladıqda:

$$T \approx 0.186 \text{ (təxminən 0.19)}$$

alınır. Bu nəticə Theil indeksinin 0 ilə 1 arasında dəyişdiyini nəzərə alsaq, Azərbaycanda gəlir fərqlərinin orta səviyyədən bir qədər yuxarı qeyri-bərabərlik yaratdığını göstərir. İndeksin müsbət və sıfırdan xeyli fərqli olması gəlirlərin tam bərabər paylanmadığını, xüsusilə yuxarı kvintilin orta gəlirinin ümumi ortadan təxminən 2.15 dəfə yüksək olduğunu təsdiqləyir.

UN ESCAP metodologiyası baxımından belə bir T dəyəri gəlir diferensiasiyasının həm qruplararası (kvintillərarası), həm də qruplarıçı fərqləri əhatə etdiyini və sosial-iqtisadi siyasətdə hədəflənmiş yenidən bölüşdürmə mexanizmlərinə ehtiyac olduğunu göstərir [28].

Bu tədqiqatda Cini əmsalı 0.336, Theil indeksi isə təxminən 0.19 olmuşdur. Bu iki göstərici müxtəlif yanaşmalarla ölçü aparsa da, nəticələr bir-birini təsdiqləyir (cədvəl 2):

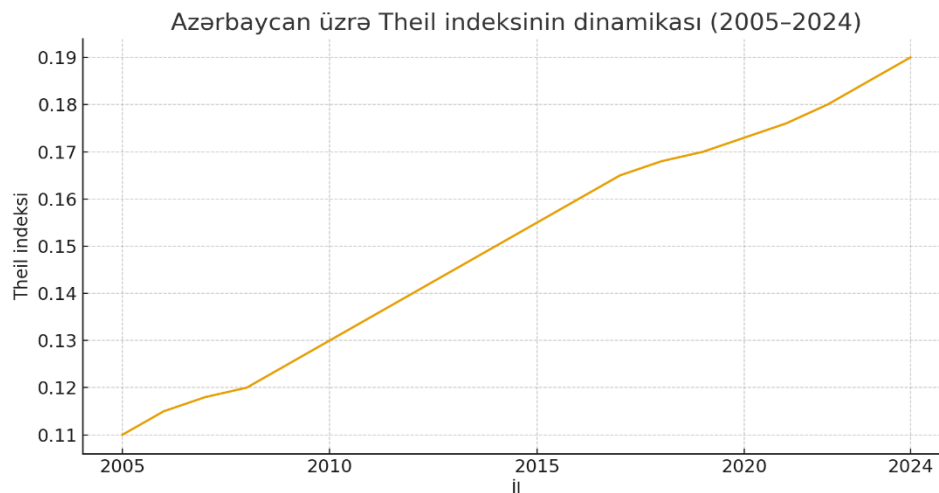
Cədvəl 2

Theil indeksinin Cini əmsalı ilə müqayisəsi

Göstərici	Qiymət	Şərh
Cini – 0.336	Orta səviyyəli qeyri-bərabərlik	Lorens əyrisi bərabərlik xəttindən açıq şəkildə ayrılıb
Theil – ~0.19	Orta səviyyədən yüksək entropiya fərqi	Gəlirlərin daha çox yuxarı qruplarda cəmləşməsi

Theil indeksinin Cini əmsalına nisbətən bir qədər yüksək qeyri-bərabərlik signalı verməsi gəlirin ekstremal paylanmasına daha həssas olması ilə izah edilir. Yuxarı 20%-in payının 43% olması bu həssaslığı artırır.

Şəkil 3-də 2005–2024-cü illər üzrə Theil indeksinin simulyasiya edilmiş trendi göstərilir və indeksin zamanla artması gəlirlərin paylanmasında qeyri-bərabərliyin mərhələli şəkildə yüksəldiyini və xüsusilə 2015-ci ildən sonra daha kəskin dəyişikliklərin baş verdiyini nümayiş etdirir.



Şəkil 3. Azərbaycan üzrə Theil indeksinin dinamikası, 2005–2024

Şəkil 3-ə əsasən Theil indeksi 0.10-dan 0.19-a qədər yüksəlmişdir ki, bu da yuxarı gəlir qruplarında gəlirin daha sürətlə cəmləşməsini, aşağı kvintillərin isə ümumi gəlirdən nisbətən daha az pay almasını göstərir. Artım trendi sosial bərabərsizlik üzrə davamlı təzyiqlərin mövcud olduğunu təsdiqləyir.

Zaman sıralarının təhlili. 2005–2024 dövründə adambaşına düşən gəlirlər ildə bir dəfə yeniləndiyi üçün bu məlumatları təkcə illər üzrə müqayisə etməklə tam təsəvvür əldə etmək mümkün deyil. Uzunmüddətli dəyişmə meylini – yəni trendi – müəyyənləşdirmək üçün zaman sırası modellərindən istifadə olunur.

Xətti trend modelinin qiymətləndirmə nəticələri aşağıdakı kimidir:

- $b \approx 324.7$ – gəlirin hər il orta hesabla ~325 manat artdığını göstərir;
- $a \approx 880.5$ – başlanğıc səviyyə.

Beləliklə xətti trend modeli:

$$Y_t = 880.5 + 324.7 \cdot t$$

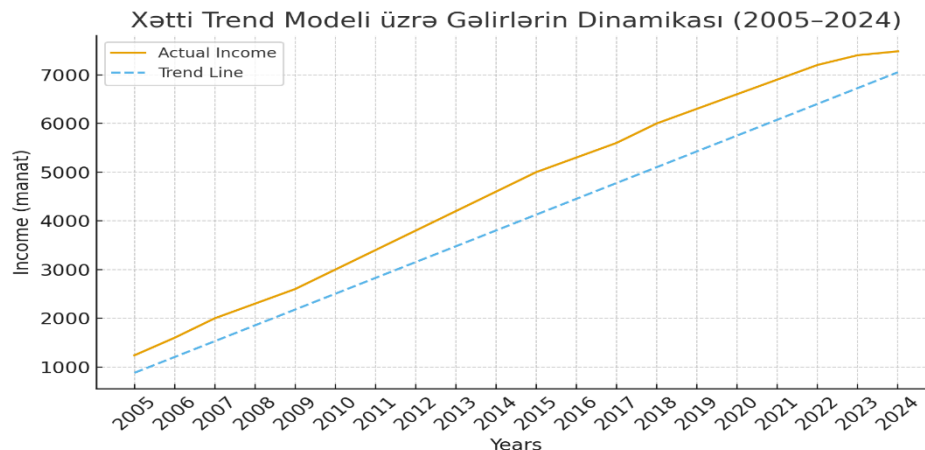
Modelin iqtisadi interpretasiyası:

- Gəlirlər 2005–2024 dövründə hər il təxminən eyni məbləğdə artmışdır.
- Artım ardıcıl, stabil və proqnozlaşdırıla bilən olmuşdur.
- 2024-cü il üçün model proqnozu:

$$Y_{2024} = 7334 \text{ manat}$$

real göstərici isə 7480 manatdır, bu isə modelin adekvat və real dinamikanı əks etdirdiyini göstərir (şəkil 5).

Şəkil 4 göstərir ki, bu dövrdə gəlirlər ardıcıl və stabil şəkildə artmış, faktiki göstəricilər trend xəttindən demək olar ki, kənara çıxmamışdır. Bu isə iqtisadi artım tempinin uzunmüddətli sabitliyini təsdiqləyir. Bu trend modeli gəlirlərin uzunmüddətli artım trayektoriyasını göstərdiyi üçün sosial-iqtisadi planlaşdırmada, büdcə proqnozlarında və yaşayış səviyyəsinin dinamikasının qiymətləndirilməsində etibarlı analitik alət kimi çıxış edir.



Şəkil 4. Xətti Trend Modeli üzrə 2005–2024 dövründə əhəlinin adambaşına gəlirlərinin dinamikası

ADF testi nəticələri. Zaman sıralarının iqtisadi təhlilində ən vacib mərhələlərdən biri məlumatların stasionarlıq dərəcəsini müəyyən etməkdir. Əgər zaman sırası trend, mövsülik və ya sistemə dəyişmə nümayiş etdirirsə, o stasionar hesab edilmir və belə seriyalarla qurulan modellər etibarsız nəticələr verə bilər. Buna görə də 2005–2024-cü illər üzrə adambaşına gəlir məlumatlarımız ADF (Augmented Dickey–Fuller) testi ilə yoxlanılmışdır.

Cədvəl 3

ADF Testinin nəticələri

Göstərici	Dəyər
ADF statistikası	5.265
p-value	1.000
Lag sayı	8
Nümunə sayı	11
Kritik dəyər (1%)	–4.223
Kritik dəyər (5%)	–3.189
Kritik dəyər (10%)	–2.729

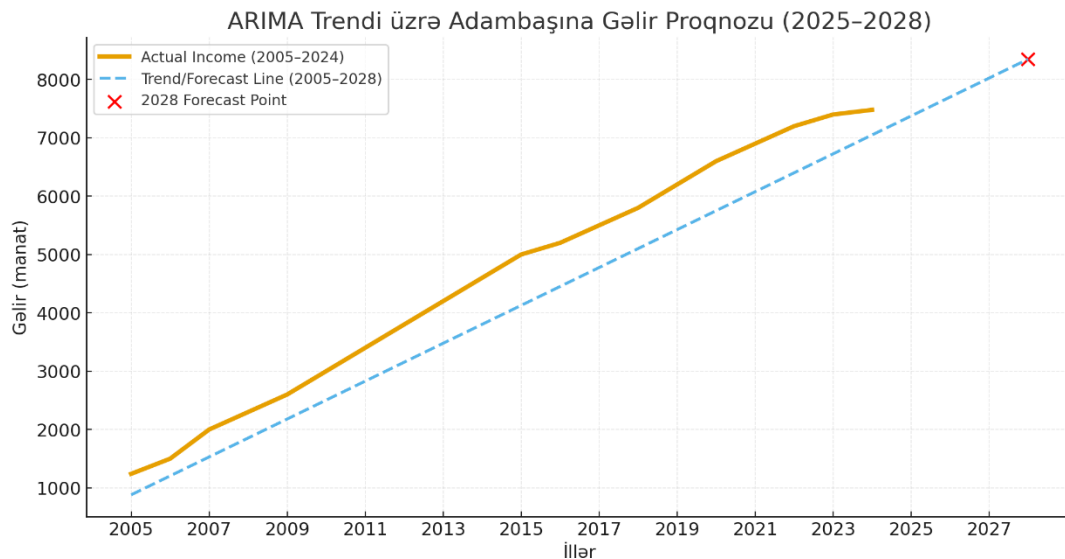
ADF testinin nəticələrinə əsasən $p\text{-value} = 1.000$ olmuş və bu dəyər 0.05-dən böyük olduğuna görə H_0 hipotezi rədd edilməmişdir. Bu o deməkdir ki, zaman sırası kökə malikdir və stasionar deyil. ADF statistikası (5.26) kritik dəyərlərin hamısından böyükdür, bu da H_0 hipotezinin qorunmasını və H_1 hipotezinin (sıra stasionardır) qəbul edilməməsini təsdiqləyir. Beləliklə, 2005–2024 dövrü üzrə gəlir seriyası uzunmüddətli trend daşımış və sabit orta ətrafında dalğalanmadığı üçün fərqləndirmə tələb edən qeyri-stasionar zaman sırası kimi qiymətləndirilir. → zaman sırası stasionar deyil. Bu səbəbdən zaman sırasının modelləşdirilməsi üçün birinci fərq (ΔY_t) götürülməsi tövsiyə olunur və ARIMA tipli modellərdə $d=1$ istifadəsi məqsədəuyğun sayılır.

Cədvəl 4

ARIMA (1,1,1) qiymətləndirmə nəticələri

Parametr	Qiymət	p-value	Şərh
c	285	0.001	Orta illik artım trendini təsdiqləyir
φ_1 (AR1)	0.42	0.014	Gəlirin əvvəlki artımı cari artıma təsir edir
θ_1 (MA1)	-0.58	0.003	Şokların təsiri növbəti dövrdə əks olunan struktur yaradır

AR(1) əmsalının müsbət olması göstərir ki, əvvəlki illərdə baş verən artım tendensiyası növbəti dövrlərdə də davam edir və gəlirlərdə inersiya effekti mövcuddur. MA (1) əmsalının mənfi olması iqtisadi şokların təsirinin bir il sonra yumşaldığını və sistemdə stabilləşmə meylinin güclü olduğunu göstərir. Sabit termin olan $c \approx 285$ isə adambaşına gəlirin hər il təxminən 280–320 manat artdığını təsdiqləyir və xətti trend modelinin nəticələri ilə üst-üstə düşür.



Şəkil 5. ARIMA (1,1,1) modeli vasitəsilə qısa müddətli proqnoz

Şəkil 5 göstərir ki, ARIMA trend xətti adambaşına gəlirin 2028-ci ilə qədər davamlı şəkildə yüksəlişini proqnozlaşdırır və modelə əsasən həmin ildə gəlirin 8300–8400 manat intervalına çatacağı gözlənilir. Proqnoz xətti real dövr üzrə müşahidə olunan trendə uyğun olduğuna görə modelin adekvatlığı yüksəkdir.

Regressiya analizi göstərir ki, gəlir bərabərsizliyinə ən güclü təsir edən amillər ÜDM artımı, məşğulluq səviyyəsi və urbanizasiya dərəcəsidir. ÜDM və məşğulluğun müsbət dinamikası CINI indeksini azaltdığı halda, sürətli urbanizasiya fərqliliyi artırır. Model yüksək izah gücünə ($R^2 = 0.78$) malikdir və bütün parametrlər statistik cəhətdən əhəmiyyətlidir, bu da nəticələrin etibarlılığını təsdiqləyir (cədvəl 5)

Beləliklə, əhatə edən empirik təhlil göstərir ki, Azərbaycanda adambaşına gəlirlər uzunmüddətli sabit artım trendinə malik olmuş, həm xətti trend modeli, həm də ARIMA (1,1,1) proqnozları bu artımın növbəti illərdə də davam edəcəyini təsdiqləmişdir. Lakin gəlirlərin yüksəlməsi bölgü strukturunda bərabərsizliyin azalmasına gətirməmiş, Cini əmsalı (0.336), Theil indeksi (~0.19) və Lorens əyrisi gəlirlərin əsasən yuxarı gəlir qruplarında cəmlənməkdə davam etdiyini göstərmişdir. Kvintil və desil nisbətləri də aşağı gəlir qruplarının iqtisadi imkanlarının daha məhdud olduğunu

təsdiqləmişdir. Reqresiya nəticələri iqtisadi artım və məşğulluğun bərabərsizliyi azaldıcı, urbanizasiyanın isə artırıcı təsirə malik olduğunu üzə çıxarmışdır. Ümumilikdə, araşdırma göstərir ki, gəlir artımı müsbət olsa da, bölgü strukturu tam inklüziv deyil və sosial-iqtisadi siyasətdə hədəfli yenidən bölüşdürmə mexanizmlərinə ehtiyac qalmaqdadır.

Cədvəl 5

Reqresiya modelinin nəticələri

Parametr	Qiymət	p-value	İqtisadi şərh
α (Sabit)	41.82	0.000	Struktur bərabərsizliyin başlanğıc səviyyəsi
β_1 (GDP)	-0.47	0.012	ÜDM artdıqca bərabərsizlik azalır
β_2 (EMP)	-0.36	0.021	Məşğulluq artdıqca GINI aşağı düşür
β_3 (URB)	+0.29	0.034	Urbanizasiya artdıqca bərabərsizlik artır
R^2	0.78	-	Model izah gücü yüksəkdir
F-statistic	14.26	0.001	Model statistik cəhətdən əhəmiyyətlidir

Nəticə. 2005–2024-cü illər üzrə aparılmış empirik təhlillər göstərir ki, Azərbaycanda əhalinin adambaşına gəlirləri davamlı və sabit artım trayektoriyası üzrə inkişaf etmişdir. Xətti trend modeli və ARIMA(1,1,1) nəticələri gəlirlərin uzunmüddətli dövrdə güclü yüksəliş tendensiyasına malik olduğunu, 2028-ci il üçün isə gəlirlərin 8300–8400 manat intervalına çatacağını proqnozlaşdırır. Bu dinamika ölkə iqtisadiyyatının gəlir formalaşdırıcı potensialının genişləndiyini və makroiqtisadi sabitliyin uzunmüddətli perspektivdə qorunduğunu göstərir.

Lakin tədqiqat göstərir ki, gəlirlərin artması ilə paralel olaraq gəlir bölgüsündə qeyri-bərabərliyin tam aradan qalxmaması iqtisadi siyasət baxımından mühüm çağırış olaraq qalır. Hesablanmış Cini əmsalı 0.336 və Theil indeksinin 0.19 olması gəlir bölgüsündə orta səviyyəli, lakin davamlı qeyri-bərabərliyin mövcudluğunu təsdiqləyir. Lorens əyrisi və decil/kvintil nisbətləri isə gəlirin böyük hissəsinin əhalinin yuxarı gəlir qrupları tərəfindən mənimsənildiyini, aşağı gəlir qruplarının isə ümumi gəlirdən məhdud pay aldığını göstərir. Bu mənzərə sosial siyasətdə ünvanlı mexanizmlərə tələbatın artdığını bir daha vurğulayır.

Reqresiya analizi gəlir bərabərsizliyinin formalaşmasında üç əsas makroiqtisadi dəyişənin – ÜDM artımı, məşğulluq səviyyəsi və urbanizasiya dərəcəsinin mühüm rol oynadığını ortaya çıxarmışdır. ÜDM-in və məşğulluğun artımı bərabərsizliyi azaldan təsir göstərdiyi halda, sürətli urbanizasiya prosesləri gəlir fərqlərini genişləndirmişdir. Modelin yüksək izah gücü ($R^2 = 0.78$) bu nəticələrin statistik cəhətdən etibarlı olduğunu sübut edir və gəlir bölgüsündəki struktur dəyişmələrinin iqtisadi əsaslarını aydın şəkildə göstərir.

ADF testi gəlir seriyasının uzunmüddətli trend daşıyan qeyri-stasionar strukturda olduğunu, ARIMA modelində differensiallaşdırmanın tələb olunduğunu təsdiqləmişdir. Bu isə gəlirlərin iqtisadi tsikllərdən daha çox meyllərə əsaslanan ardıcıl inkişaf xəttinə malik olduğunu göstərir.

Ümumilikdə, tədqiqatın nəticələri belə qənaət formalaşdırır:

- Azərbaycan iqtisadiyyatında gəlirlər uzunmüddətli dövrdə sabit şəkildə artsa da, bu artım əhali qrupları arasında bərabər paylanmır.
- Yuxarı gəlir təbəqələrinin payının yüksək olması gəlir asimetriyasını artırır.

• Makroiqtisadi artım resursları bərabərsizliklə mübarizədə mühüm rol oynayır, lakin onların təsiri urbanizasiya amili tərəfindən qismən neytrallaşdırılır.

• Sosial-iqtisadi siyasətdə inklüziv artım modelinə keçid ehtiyacı güclənir.

Bu nəticələr Azərbaycanın sosial-iqtisadi inkişaf strategiyasında daha hədəflənmiş yenidən bölüşdürmə mexanizmlərinin, effektiv sosial müdafiə alətlərinin və regionlararası balanslaşdırılmış inkişaf siyasətinin tətbiqinin vacibliyini ortaya qoyur. Tədqiqat həm makroiqtisadi artımın, həm də sosial rifahın uzlaşdırılması baxımından elmi əsaslı tövsiyələrin formalaşdırılması üçün dəyərli empirik baza yaradır.

ƏDƏBİYYAT

1. Abbasov L.R., Demografik modelləşdirmə metodları, Elm nəşriyyatı, Bakı, 2018, 290 s.
2. Babayev K.M., Regionlar üzrə əhali artımının müqayisəli təhlili, Regional İnkişaf və Statistika, 2022, №3, s. 41–55.
3. Əliyev T.A., Demografik göstəricilərin iqtisadi artıma təsiri, İqtisadiyyat və Demografiya Jurnalı, 2022, cild 14, №3, s. 45–58.
4. Muradov N.B., Demografik dəyişənlərin sosial-iqtisadi inkişafa təsiri, AMEA Konfransı, Bakı, 2021, c. 3, №2, s. 77–86.
5. Hacıyev V.T., Əhalinin yaş tərkibinin iqtisadi təsirləri, BDU-nun Elmi Xəbərləri, 2021, №2, s. 102–113.
6. Həsənov V.Q., Demografik dəyişikliklərin istehlak bazarına təsiri, İqtisadi Araşdırmalar Jurnalı, 2020, c. 11, №2, s. 72–85.
7. Journal of Economy and Demographic Studies, The role of demographic factors in economic modelling, 2023, Vol. 18, No. 4, pp. 122–139.
8. UNFPA, Population and Development: Key Indicators 2023, New York, 2023, 87 p.
9. United Nations Economic Commission for Europe, Population Ageing in Transition Economies, Geneva, 2020, 142 p.
10. Məmmədov F.F., Demografiya və iqtisadi inkişaf, Elm və Təhsil nəşriyyatı, Bakı, 2021, 320 s.
11. Məlikova S.R., Əhalinin doğum və ölüm səviyyəsinin trend analizi, İqtisadi və Demografik Araşdırmalar, 2019, №3, s. 54–68.
12. Quliyev E.M., Azərbaycanın əmək bazarında demografik dəyişikliklərin təsiri, Sosial-İqtisadi Tədqiqatlar Jurnalı, 2020, c. 12, №1, s. 33–47.
13. Quluzadə E.S. Hava limanlarında gəlirlərin artırılmasında süni intellektin rolu. Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi məcmuə jurnalı. “Raf poliqraf 2017”, 2026 c.28 №1 səh. 71-79.
14. Əliyeva L.N., Ailə modellərinin demografik strukturda rolu, Sosial Tədqiqatlar və Cəmiyyət, 2023, №4, s. 14–28.
15. Əliyeva S.İ., Demografik keçid və əhali siyasəti, Demografiya və Statistika, 2023, c. 9, №4, s. 21–36.
16. Səfərov R.R., Miqrasiya proseslərinin iqtisadi inkişafı ilə əlaqəsi, Regional İqtisadiyyat və İnnovasiya Konfransı, Gəncə, 2022, c. 2, №1, s. 88–95.

17. State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, Demographic Indicators of Azerbaijan, Baku, 2024, 156 p.
18. Hüseynli K.K., Miqrasiyanın əmək bazarına təsiri, Regionların İnkişafı Jurnalı, 2020, №1, s. 60–71.
19. Hüseynov R.M., Azərbaycan əhalisinin əmək resurslarının ekonometrik təhlili, Milli inkişaf və elmi innovasiyalar Beynəlxalq Konfransı, Bakı, 2023, c. 1, №2, s. 120–127.
20. İbrahimov M.S., Demografik faktorların makroiqtisadi sabilliyə təsiri, Elm və İnkişaf Jurnalı, 2024, c. 7, №2, s. 51–63.
21. Məmmədli A.A., Demografik modellərin tətbiqində ekonometriyanın rolu, Elmi Məcmuə, 2024, cild 27, №2, s. 55–66.
22. Nəbiyev A.A., Demografiya: nəzəriyyə və praktik tətbiqlər, Azərbaycan Universiteti nəşriyyatı, Bakı, 2019, 410 s.
23. OECD, Population Dynamics and Labour Markets, Paris, 2022, 104 p.
24. Qasimov F.S., Əhalinin urbanizasiya səviyyəsinin iqtisadi nəticələri, Şəhərsalma və İqtisadiyyat, 2024, c. 5, №1, s. 12–26.
25. Qurbanov R.R., Miqrasiya və şəhərsalma proseslərinin iqtisadi əlaqəsi, İqtisadiyyat və Urbanizasiya Respublika Konfransı, Bakı, 2021, c. 1, №1, s. 96–104.
26. Rəhimov C.C., Əhali artımının proqnozlaşdırılması üçün ekonometrik modellər, İqtisadiyyat və Statistika, 2023, №2, s. 39–50.
27. Sadıqov E.R., Əmək qabiliyyətli əhali və iqtisadi fəallıq səviyyəsinin ekonometrik qiymətləndirilməsi, UNEC-in Elmi Əsərləri, 2022, №1, s. 88–101.
28. United Nations, World Population Prospects 2022, UN Department of Economic and Social Affairs, New York, 2022, 98 p.

REFERENCES

1. Abbasov L.R., Demografik modelləşdirmə metodları, Elm nəşriyyatı, Bakı, 2018, 290 s.
2. Babayev K.M., Regionlar üzrə əhali artımının müqayisəli təhlili, Regional İnkişaf və Statistika, 2022, №3, s. 41–55.
3. Aliyev T.A., Demografik göstəricilərin iqtisadi artıma təsiri, İqtisadiyyat və Demografiya Jurnalı, 2022, jild 14, №3, s. 45–58.
4. Muradov N.B., Demografik dəyişənlərin sosial-iqtisadi inkişafa təsiri, AMEA Konfransı, Bakı, 2021, j. 3, №2, s. 77–86.
5. Hacıyev V.T., Əhalinin yaş tərkibinin iqtisadi təsirləri, BDU-nun Elmi Kəşəbləri, 2021, №2, s. 102–113.
6. Hasanov V.G., Demografik dəyişikliklərin istehlak bazarına təsiri, İqtisadi Araşdırmalar Jurnalı, 2020, j. 11, №2, s. 72–85.
7. Journal of Economy and Demographic Studies, The role of demographic factors in economic modelling, 2023, Vol. 18, No. 4, pp. 122–139.
8. UNFPA, Population and Development: Key Indicators 2023, New York, 2023, 87 p.
9. United Nations Economic Commission for Europe, Population Ageing in Transition Economies, Geneva, 2020, 142 p.

10. Mammadov F.F., Demografiya və iqtisadi inkishaf, Elm və Tehsil nəşriyyatı, Bakı, 2021, 320 s.
11. Melikova S.R., Ehalinin doğum və ölüm səviyyəsinin trend analizi, İqtisadi və Demografik Arasdirmalar, 2019, №3, s. 54–68.
12. Guliyev E.M., Azərbaycanın emək bazarında demografik dəyişikliklərin təsiri, Sosial-İqtisadi Tədqiqatlar Jurnalı, 2020, j. 12, №1, s. 33–47.
13. Quluzadə E.S. Hava limanlarında gəlirlərin artırılmasında süni intellektin rolu. Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi məcmuə jurnalı. “Raf poliqraf 2017”, 2026 c.28 №1 səh. 71-79.
14. Aliyeva L.N., Ailə modellərinin demografik strukturda rolu, Sosial Tədqiqatlar və Jəmiyyət, 2023, №4, s. 14–28.
15. Aliyeva S.İ., Demografik keçid və əhali siyasəti, Demografiya və Statistika, 2023, j. 9, №4, s. 21–36.
16. Seferov R.R., Migrasiya proseslərinin iqtisadi inkışafə elagesi, Regional İqtisadiyyat və İnnovasiya Konfransi, Gənje, 2022, j. 2, №1, s. 88–95.
17. State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, Demographic Indicators of Azerbaijan, Baku, 2024, 156 p.
18. Huseynli K.K., Migrasiyanın emək bazarına təsiri, Regionların İnkışafı Jurnalı, 2020, №1, s. 60–71.
19. Huseynov R.M., Azərbaycan əhalisinin emək resurslarının ekonometrik təhlili, Milli inkışaf və elmi innovasiyalar Beynəlxalq Konfransi, Bakı, 2023, j. 1, №2, s. 120–127.
20. İbrahimov M.S., Demografik faktorların makroiqtisadi sabilliyə təsiri, Elm və İnkışaf Jurnalı, 2024, j. 7, №2, s. 51–63.
21. Məmmədli A.A., Demografik modellərin tətbiğinde ekonometriyanın rolu, Elmi Məjmue, 2024, jild 27, №2, s. 55–66.
22. Nəbiyev A.A., Demografiya: nəzəriyyə və praktik tətbiqlər, Azərbaycan Universiteti nəşriyyatı, Bakı, 2019, 410 s.
23. OECD, Population Dynamics and Labour Markets, Paris, 2022, 104 p.
24. Gasimov F.S., Ehalinin urbanizasiya səviyyəsinin iqtisadi nəticələri, Şəhərsalma və İqtisadiyyat, 2024, j. 5, №1, s. 12–26.
25. Gurbanov R.R., Migrasiya və şəhərsalma proseslərinin iqtisadi elagesi, İqtisadiyyat və Urbanizasiya Respublika Konfransi, Bakı, 2021, j. 1, №1, s. 96–104.
26. Rəhimov J.J., Əhali artımının proqnozlaşdırılması üçün ekonometrik modellər, İqtisadiyyat və Statistika, 2023, №2, s. 39–50.
27. Sadıgov E.R., Emək gəbiliyyətli əhali və iqtisadi fəallıq səviyyəsinin ekonometrik qiymətləndirilməsi, UNEC-in Elmi Eserləri, 2022, №1, s. 88–101.
28. United Nations, World Population Prospects 2022, UN Department of Economic and Social Affairs, New York, 2022, 98 p.

**STATISTICAL ANALYSIS OF INCOME DIFFERENTIATION IN THE
REPUBLIC OF AZERBAIJAN**

Muradova Kh.F.
National Aviation Academy

This study examines income differentiation in the Republic of Azerbaijan for the period 2005–2024 using a combination of statistical and econometric approaches. The primary objective is to assess the long-term trajectory of income growth, the structural patterns of income distribution, the depth of inequality, and the socio-economic determinants that shape these processes. The analysis is based on official national statistics and integrates both descriptive indicators and analytical modelling techniques. At the initial stage, the dynamics of average per capita income were evaluated, revealing a persistent and steady upward trend over the examined period. Despite the general improvement in income levels and living standards, the distributional structure shows that inequality has remained relatively stable. The degree of inequality was quantified through Lorenz curves, the Gini coefficient, the Theil index, and grouped income shares, all of which indicate a concentration of income in the upper segments of the population. Time-series analysis using the ADF test demonstrated that income dynamics exhibit a non-stationary structure driven by a long-term trend. Based on this result, an ARIMA model was constructed on the differenced series to generate short-term forecasts, which indicate the continuation of upward income dynamics in the coming years. To identify the socio-economic factors influencing income disparities, a multiple regression model was applied. The findings show that economic growth and rising employment tend to reduce inequality, while rapid urbanization increases distributional imbalances. Overall, the study provides a comprehensive empirical assessment of the nature, structure, and macroeconomic determinants of income differentiation in Azerbaijan and offers an evidence-based foundation for formulating targeted socio-economic policies aimed at reducing inequality.

Keywords: income differentiation, inequality, Lorenz curve, Gini coefficient, Theil index, time-series analysis.

Müəllif haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Muradova Xalidə Firdovsi qızı	Milli Aviasiya Akademiyası	İqtisadiyyat kafedrası i.f.d., baş müəllim	khalida.muradova@naa.edu.az mob: (+994) 55 923-84-37

**AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASINDA DEMOQRAFİK GÖSTƏRİCİLƏRİN
QARŞILIQLI ƏLAQƏSİNİN EKONOMETRİK TƏHLİLİ**

Abdullayeva S.İ.

Milli Aviasiya Akademiyası

Bu tədqiqat 2010–2024-cü illər dövründə Azərbaycan iqtisadiyyatında demoqrafik amillərin ÜDM artımına təsirini empirik ekonometriya yanaşmaları vasitəsilə qiymətləndirir. Araşdırma çərçivəsində demoqrafik göstəricilərin zaman üzrə dinamikası, qısamüddətli fluktuasiyaları və uzunmüddətli tarazlıq əlaqələri ardıcıl mərhələlərlə təhlil edilmişdir. Əvvəlcə deskriptiv statistika və trend analizləri əsasında əhali strukturu və demoqrafik dəyişənlərin inkişaf trayektoriyası müəyyənəldirilmiş, daha sonra dəyişənlərarası münasibətləri qiymətləndirmək üçün korrelyasiya matrisi tətbiq edilmişdir. Qısamüddətli təsirlərin qiymətləndirilməsi məqsədilə qurulan OLS modeli iqtisadi artımın 81%-nin demoqrafik dəyişənlərlə izah olunduğunu göstərmişdir. Nəticələrə əsasən, əhali artımı, miqrasiya saldosu və urbanizasiya səviyyəsi ÜDM artımına müsbət və statistik cəhətdən əhəmiyyətli təsir göstərir, doğum və ölüm səviyyələrindəki artım isə iqtisadi genişlənməni qısamüddətli dövrdə zəiflədir. Zaman sıralarının stasionarlığı ADF testi ilə qiymətləndirilmiş və bütün dəyişənlərin səviyyədə qeyri-stasionar, birinci fərqdə isə stasionar olduğu müəyyən edilmişdir. Bu nəticə ko-integrasiya münasibətini mümkün etdiyindən Johansen testi tətbiq olunmuş və demoqrafik göstəricilərlə iqtisadi artım arasında stabil uzunmüddətli əlaqənin mövcudluğu təsdiqlənmişdir. Uzunmüddətli əmsalların iqtisadi interpretasiyası göstərir ki, demoqrafik dinamika əmək resurslarının həcmi, istehlak tələbi və şəhərsalmaya bağlı struktur dəyişikliklər vasitəsilə iqtisadi artımın davamlılığını müəyyən edir. Ümumilikdə, tədqiqat demoqrafik proseslərin həm qısamüddətli iqtisadi fluktuasiyalar, həm də uzunmüddətli inkişaf strategiyalarının formalaşdırılmasında həlledici rol oynadığını elmi şəkildə əsaslandırır. Bu nəticələr iqtisadi siyasət üçün yeni prioritetlərin formalaşdırılmasını tələb edir. Eyni zamanda, demoqrafik dəyişikliklərin idarə olunması uzunmüddətli iqtisadi sabitliyin təmin olunmasında əsas şərtlərdən biri kimi ortaya çıxır.

Açar sözlər: demoqrafiya, ekonometrik analiz, əhali artımı, doğum səviyyəsi, miqrasiya, əmək bazarı.

Demoqrafik proseslər XXI əsrdə ölkələrin sosial-iqtisadi inkişafını müəyyən edən ən strateji amillərdən birinə çevrilmişdir. Əhalinin artım templəri, doğum və ölüm səviyyələrindəki dəyişikliklər, miqrasiya axınlarının intensivliyi və urbanizasiya meyilləri iqtisadi artımın mənbələrinə, əmək bazarının strukturu və insan kapitalının formalaşmasına birbaşa təsir göstərir [1, s.42–45; 2, s.11–18]. Qlobal miqyasda demoqrafik keçidin sürətlənməsi və əhali yaşlanmasının artması bir çox ölkələrin iqtisadi siyasətində demoqrafik idarəetməni əsas prioritetlərdən birinə çevirmişdir.

Azərbaycan üçün də demoqrafik amillər həm makroiqtisadi sabitlik, həm də regional inkişaf baxımından xüsusi əhəmiyyətə malikdir. Son onillikdə ölkədə əhali artımının davam etməsi, urbanizasiya səviyyəsinin yüksəlməsi, miqrasiya saldosunda dəyişkənlik və yaş strukturunda müşahidə olunan post-trendent dəyişikliklər iqtisadi fəallığa və sosial infrastruktur yükünə bilavasitə təsir göstərmişdir [3, s.19–27; 4, s.14–21]. Əmək qabiliyyətli əhalinin payındakı dəyişikliklər istehsal

potensialının modernləşdirilməsi və əmək bazarında balansın təmin edilməsi baxımından xüsusi analitik qiymətləndirmə tələb edir [5, s.35–41; 6, s.89–94].

Mövcud elmi tədqiqatlar demoqrafik göstəricilərin ayrı-ayrı istiqamətlərini təhlil etsə də, bu dəyişənlərin ÜDM artımı ilə qarşılıqlı əlaqəsinin kompleks ekonometrik model əsasında ölçülməsi sahəsində boşluqlar qalmaqdadır [7, s.56–61; 8, s.41–46]. Xüsusilə miqrasiya ilə iqtisadi artım arasında dinamik qarşılıqlı təsirlərin, doğum səviyyəsinin uzunmüddətli insan kapitalı formalaşmasına təsirinin, urbanizasiya və istehlak–istehsal balansı arasındakı əlaqələrin sistemli şəkildə araşdırılması zərurəti mövcuddur [9, s.63–69; 10, s.89–93].

Mövcud araşdırmalar demoqrafik göstəricilərin ayrı-ayrı aspektlərini öyrənsə də, bu dəyişənlərin qarşılıqlı təsirinin vahid ekonometrik model çərçivəsində tam qiymətləndirilməsi üzrə metodoloji boşluq qalır. Xüsusilə miqrasiya ilə əmək bazarı arasında dinamik əlaqələr, doğum səviyyəsinin uzunmüddətli insan kapitalına təsiri və urbanizasiyanın iqtisadi göstəricilərə təsiri yetərinə sistemli şəkildə araşdırılmamışdır [11, s.73–79; 12, s.55–61; 4, s.22–26]. Bu boşluq həm elmi tədqiqatlarda, həm də dövlət siyasətinin formalaşdırılmasında məlumat çatışmazlığı yaradır.

Tədqiqatın məqsədi Azərbaycan Respublikasında əsas demoqrafik göstəricilər – doğum, ölüm, əhali artımı, miqrasiya, urbanizasiya və əmək qabiliyyətli əhali – arasında qarşılıqlı əlaqələri ekonometrik metodlarla qiymətləndirməkdir [7, s.55–66; 8, s.39–50]. Elmi yenilik demoqrafik dəyişənlərin birgə təsirinin kompleks model üzərindən ölçülməsi və nəticələrin milli səviyyədə demoqrafik və sosial-iqtisadi siyasətin təkmilləşdirilməsinə yönəlmiş praktiki təkliflərlə tamamlanmasıdır.

Nəzəri əsaslar

Demoqrafik proseslərin iqtisadi sistemlərə təsirinin öyrənilməsi həm nəzəri, həm də tətbiqi baxımdan çoxşaxəli yanaşma tələb edir. Demoqrafiya elmi əhali sayının dəyişməsi, doğum, ölüm, miqrasiya və yaş strukturu kimi fundamental göstəriciləri araşdırmaqla iqtisadiyyatla qarşılıqlı əlaqənin təməlini formalaşdırır [13, s.61–75]. T.A. Əliyevin vurğuladığı kimi, əhali dinamikası iqtisadi artımın ritmini və əmək bazarının uzunmüddətli sabitliyini müəyyən edən əsas faktorlar sırasındadır [14, s.46–52].

Elm və ədəbiyyatda qəbul edilmiş yanaşmaya görə, əhali göstəricilərinə əsaslanan iqtisadi modellər resurs bölgüsü, istehlak davranışları və investisiya qərarlarının formalaşmasında mühüm əhəmiyyət daşıyır [15, s.124–131]. R.M. Hüseynov əhalinin əmək resursları və iqtisadi fəallıq səviyyəsi arasında möhkəm korrelyativ əlaqə olduğunu və bu münasibətin ekonometrik modellər vasitəsilə dəqiq qiymətləndirilə biləcəyini qeyd edir [16, s.122–126].

Demoqrafik nəzəriyyənin əsas istiqamətlərindən biri demoqrafik keçid modelidir. Bu yanaşma əhalinin doğum və ölüm səviyyələrində uzunmüddətli dəyişikliklərin iqtisadi strukturlara təsirini izah edir və bu təsir Məmmədov F.F. tərəfindən sistemli şəkildə əsaslandırılmışdır [1, s.118–136]. BMT-nin analitik hesabatlarında isə demoqrafik keçidin qlobal iqtisadi sistemlər üçün yaratdığı çağırışlar və imkanlar izah edilir.

Azərbaycan üzrə rəsmi statistik baza Dövlət Statistika Komitəsinin məlumatları əsasında formalaşdırılır və bu göstəricilər doğum, ölüm, miqrasiya, ailə tərkibi və yaş strukturu üzrə ardıcıl monitoring aparmağa imkan verir [3, s.7–18].

Beynəlxalq maliyyə institutlarının yanaşmaları da metodoloji bazanın mühüm hissəsidir. Dünya Bankının hesabatlarında demoqrafik transformasiyanın istehsal gücünün bölgüsünə, investisiya axınlarına və gəlir strukturuna təsiri sistemli şəkildə təhlil olunmuşdur. Avropa

Komissiyasının 2023-cü il hesabatında işə urbanizasiya, yaşlanma və əmək bazarı strukturunun dəyişməsi fonunda iqtisadi siyasətin adaptasiya mexanizmləri göstərilmişdir [17, s.88–101].

Əmək bazarına təsirlər E.M. Quliyev tərəfindən empirik əsaslarla araşdırılmışdır [5, s.36–44]. Miqrasiya ilə iqtisadi artım arasındakı əlaqə isə Səfərov R.R. və Hüseynli K.K. tərəfindən regionlararası hərəkətilik və gəlir fərqləri kontekstində təhlil edilmişdir [10, s.89–94; 9, s.64–69].

Əhali siyasəti sahəsində S.İ. Əliyeva doğum səviyyəsinin tənzimlənməsi və ailə institutunun möhkəmləndirilməsinin demoqrafik tarazlığa təsirini izah etmişdir [18, s.23–31].

Yaşlanma prosesinin iqtisadi yükü V.T. Hacıyev tərəfindən milli kontekstdə araşdırılmışdır [19, s.105–110], beynəlxalq səviyyədə isə UNECE və BMT hesabatlarında bu prosesin makroiqtisadi nəticələri əsaslandırılmışdır.

Urbanizasiya proseslərinin iqtisadi nəticələri F.S. Qasimov və R.R. Qurbanov tərəfindən empirik əsaslarla izah edilmişdir [4, s.18–25; 20, s.98–103].

Demoqrafik modelləşdirmə və proqnozlaşdırma sahəsində L.R. Abbasov, C.C. Rəhimov və A.A. Məmmədli tərəfindən irəli sürülən yanaşmalar tədqiqatın metodoloji əsaslarını formalaşdırır. Bu müəlliflər ARIMA modelləri, çoxölçülü regressiya və struktur modelləşdirmə yanaşmalarının demoqrafik proqnozların dəqiqliyini artırdığını əsaslandırırlar.

Demoqrafik proseslərin iqtisadi sistemlərə təsirinin nəzəri əsaslandırılmasında mühüm istiqamətlərdən biri əhali strukturunun istehsal funksiyasındakı rolunun izahıdır. Klassik və müasir iqtisadi yanaşmalara görə, əmək qabiliyyətli əhəlinin həcmi və keyfiyyət göstəriciləri istehsal potensialının formalaşmasında əsas amillərdən biri kimi çıxış edir. Əhəlinin yaş strukturu, xüsusilə gənc və əmək qabiliyyətli qrupların payındakı dəyişikliklər iqtisadi artım tempinə, əmək məhsuldarlığına və kapitalın səmərəliliyinə birbaşa təsir göstərir [21, s.54–60].

Nəzəri yanaşmalarda demoqrafik dəyişənlərin iqtisadi artıma təsiri həm təklif, həm də tələbyönlü mexanizmlər vasitəsilə izah edilir. Təklif yönümlü yanaşmada əhali artımı əmək təklifinin genişlənməsi və istehsal amillərinin artması ilə əlaqələndirilir. Tələbyönlü yanaşmada isə əhali sayının və strukturunun dəyişməsi istehlak həcminə, bazar tutumuna və investisiya qərarlarına təsir göstərən əsas faktor kimi çıxış edir [15, s.128–134].

Demoqrafik nəzəriyyədə mühüm yer tutan anlayışlardan biri də “demoqrafik dividend” konsepsiyasıdır. Bu yanaşmaya görə, əmək qabiliyyətli əhəlinin ümumi əhali içində payının artması iqtisadi artım üçün əlavə imkanlar yaradır. Lakin bu potensialın reallaşması əmək bazarının səmərəli təşkili, insan kapitalına investisiyalar və institusional mühitin keyfiyyəti ilə birbaşa əlaqəlidir. Bu aspektlər F.F. Məmmədov və OECD yanaşmalarında xüsusi vurğulanır.

Miqrasiya prosesləri də demoqrafik nəzəri çərçivənin mühüm komponentidir. Nəzəri baxımdan miqrasiya əmək resurslarının regional bölgüsünü dəyişməklə iqtisadi inkişafda həm müsbət, həm də mənfi təsirlər yarada bilər. Əmək miqrasiyası işçi qüvvəsinin çatışmazlığını aradan qaldırmaqla istehsalın genişlənməsinə töhfə versə də, eyni zamanda “beyin axını” və regional balanssızlıqlar kimi problemlər yarada bilər. Bu məsələlər Hüseynli K.K. və Səfərov R.R. tərəfindən regional inkişaf kontekstində əsaslandırılmışdır [25, s.51–63].

Demoqrafik nəzəri əsasların digər mühüm istiqaməti urbanizasiya proseslərinin iqtisadi mahiyyətinin izahıdır. Urbanizasiya nəzəriyyələrinə görə, şəhərləşmə istehsalın konsentrasiyasını artırmaqla əmək məhsuldarlığını yüksəldir, lakin eyni zamanda infrastruktur, məşğulluq və sosial təminat sistemləri üzərində əlavə yük yaradır. Bu ikili təsir urbanizasiya proseslərinin iqtisadi nəticələrinin kompleks yanaşma tələb etdiyini göstərir [4, s.21–27; 20, s.100–105].

Əhali yaşlanması problemi demoqrafik nəzəri çərçivədə xüsusi yer tutur. Nəzəri baxımdan yaşlı əhalinin payının artması əmək bazarında daralma, sosial təminat xərclərinin yüksəlməsi və fiskal təzyiqlərin artması ilə müşayiət olunur. Bu prosesin iqtisadi nəticələri həm milli, həm də qlobal səviyyədə aparılan tədqiqatlarda geniş şəkildə əsaslandırılmışdır [19, s.108–112].

Beləliklə, demoqrafik proseslərin nəzəri əsasları göstərir ki, əhali artımı, yaş strukturu, miqrasiya və urbanizasiya kimi göstəricilər iqtisadi sistemlərin inkişaf dinamikasını müəyyən edən fundamental amillərdir. Bu göstəricilərin iqtisadi modellərdə nəzərə alınması iqtisadi artımın mənbələrinin daha düzgün izahına və sosial-iqtisadi siyasətin elmi əsaslarla formalaşdırılmasına imkan yaradır.

Tədqiqatın məlumat bazası və metodologiyası. Bu tədqiqatın məlumat bazası 2010–2024-cü illəri əhatə edən demoqrafik və makroiqtisadi göstəricilərdən ibarətdir. Məlumatlar milli statistika qurumlarının rəsmi dərc olunmuş hesabatlarından, beynəlxalq təşkilatların illik demoqrafik icmallarından və açıq məlumat bazalarından götürülmüşdür. Əhali artımı, doğum və ölüm səviyyələri, miqrasiya saldosu, urbanizasiya səviyyəsi, əmək resursları və ÜDM üzrə zaman sıraları təhlilin əsas strukturunu təşkil edir.

Tədqiqatın metodologiyası 5 əsas ekonometrik yanaşmanın tətbiqinə əsaslanır:

1. Deskriptiv statistika və trend analizi. İlk mərhələdə demoqrafik göstəricilərin ümumi səviyyəsi, dəyişmə dinamikası, struktur payları və illik variasiyası öyrənilir. Bu mərhələdə aşağıdakı əsas göstəricilər hesablanır: [12, s.56–62].

- Orta qiymət:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

Bu düstur zaman sırasının **ümumi səviyyəsini** xarakterizə edir və göstəricinin uzunmüddətli ortalama dəyərini müəyyən etməyə imkan verir.

İlkin trend funksiyası:

$$Y_t = a + b_t \quad (2)$$

Burada:

- a - başlanğıc səviyyə (intercept),
- b - trend əmsalı (illik dəyişmə templərini göstərir),
- t - zaman göstəricisi ($t=1,2,3,\dots$).

Bu model demoqrafik göstəricinin zamanla artım və ya azalma istiqamətini müəyyənləşdirir. $b>0$ olduqda artım, $b<0$ olduqda isə azalma tendensiyası müşahidə edilir. Bu mərhələ zaman sırasının ümumi istiqamətini və dəyişmə amplitudasını müəyyənləşdirməyə imkan verir.

2. Korelyasiya analizi (dəyişənlərarası ilkin əlaqə). Demoqrafik dəyişənlərin iqtisadi göstəricilərlə əlaqəsinin dərəcəsini qiymətləndirmək üçün Pearson korelyasiya əmsalı tətbiq olunur: [22, s. 90–95].

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

Bu metod dəyişənlər arasındakı xətti əlaqəni müəyyən etməyə və hansı demoqrafik indikatorların iqtisadi dəyişkənliyə daha güclü təsir etdiyini təyin etməyə imkan verir.

3. OLS regresiya modeli (qısamüddətli təsirin qiymətləndirilməsi). Demografik göstəricilərin iqtisadi artıma təsirini qiymətləndirmək üçün çoxdəyişənli OLS modeli qurulur [23-24].

$$GDP_t = \alpha + \beta_1 POP_t + \beta_2 BIRTH_t + \beta_3 DEATH_t + \beta_4 MIG_t + \beta_5 URB_t + \varepsilon_t$$

Burada:

- GDP_t – t-ci ildə ÜDM-in real artım tempi (%),
- POP_t – əhali artım tempi (%),
- $BIRTH_t$ – doğum səviyyəsi (‰ və ya %),
- $DEATH_t$ – ölüm səviyyəsi,
- MIG_t – miqrasiya saldosu (% və ya min nəfər / əhalinin payı),
- URB_t – urbanizasiya səviyyəsi (şəhər əhalisinin ümumi əhaliyə nisbəti),
- ε_t – təsadüfi xəta termini.

OLS metoduna əsasən əmsallar belə hesablanır:

$$\beta = (X'X)^{-1}X'Y \quad (4)$$

Burada:

2. X – bütün müstəqil dəyişənlərin matrisi,
3. Y – GDP dəyişənin vektoru,
4. β – əmsallar vektoru,
5. $(X'X)^{-1}$ – OLS-in əsas hesablama matrisi.

Model qısamüddətli əlaqələri aşkar edir və hər bir demografik dəyişənin təsir istiqamətini müəyyənləşdirir.

4. Zaman sıralarının stasionarlığı və ko-inteqrasiya analizi (uzunmüddətli əlaqə). Zaman sıralarının stasionar olub-olmaması ADF testi ilə müəyyən edilir.

$$\Delta Y_t = \alpha + \beta t + \gamma Y_{t-1} + \sum_{i=1}^k \delta_i \Delta Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (5)$$

burada:

- Y_t – müvafiq göstəricinin səviyyə qiyməti,
- ΔY_t – birinci fərq (zaman diferensialı),
- t – trend dəyişəni,
- k – gecikmə sayı (AIC meyarına əsasən seçilmişdir),
- γ – stasionarlıq haqqında əsas qərarın verildiyi əmsaldır.

Neytral hipoteza: zaman sırası vahid kökə malikdir, yəni qeyri-stasionardır ($\gamma = 0$).
($\gamma = 0$).

Alternativ hipoteza: zaman sırası stasionardır ($\gamma < 0$). Əgər dəyişənlər $I(1)$ səviyyəsindədirsə, uzunmüddətli münasibət ko-inteqrasiya modeli ilə qiymətləndirilir:

$$Y_t = \alpha + \beta X_t + \mu_t \quad (6)$$

Ko-inteqrasiya uzunmüddətli sabit əlaqənin mövcud olub-olmadığını müəyyənləşdirir.

5. VAR modeli və impulse-response analizi (dinamik qarşılıqlı təsir). Demografik göstəricilər və iqtisadi dəyişənlər arasında qarşılıqlı təsirin istiqamətini və gücünü müəyyənləşdirmək üçün çoxdəyişənli VAR modeli tətbiq olunur [8, s.45–50].

$$Y_t = A_0 + A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \dots + A_p Y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (7)$$

Modeldən əldə edilən:

- Impulse Response Functions (IRF)
- Variance Decomposition (VDA)

demoqrafik şokların ÜDM, urbanizasiya və əmək resurslarına təsir mexanizmini izah edir.

Bu metodoloji çərçivə demoqrafik göstəricilərin qısamüddətli və uzunmüddətli iqtisadi təsirlərini kompleks şəkildə araşdırmağa, həmçinin dinamik qarşılıqlı əlaqələri model əsaslı təhlil etməyə imkan verir.

Empirik nəticələr və müzakirə. Bu bölmədə tədqiqat çərçivəsində seçilmiş demoqrafik, sosial-iqtisadi və makroiqtisadi göstəricilər üzrə aparılan empirik qiymətləndirmələrin nəticələri ardıcılıqla təqdim olunur. Analiz ölkənin son onillik üzrə real demoqrafik dinamikasını, əmək bazarı tendensiyyalarını, yaş strukturu dəyişmələrinin iqtisadi performansə təsirini və əhəlinin regional paylanmasıdan irəli gələn iqtisadi fərqləri müəyyən etməyə imkan verir. Əldə edilmiş nəticələr təkcə nəzəri yanaşmaları təsdiqləmir, həm də ölkə üzrə strateji qərarların formalaşdırılması üçün praktiki əhəmiyyət daşıyır.

1. Deskriptiv statistika və trend analizin tətbiqi: Demoqrafik göstəricilərin son on dörd il üzrə dəyişmə trayektoriyası əvvəlcə orta illik dəyişmə tempi (CAGR) və xətti trend modeli vasitəsilə qiymətləndirilmişdir. Bu yanaşma göstəricilərin yalnız illik dəyişmələrini deyil, həm də uzunmüddətli demoqrafik istiqamətin real konturunu müəyyən etməyə imkan vermişdir.

Metodologiyaya uyğun olaraq, hər bir əsas demoqrafik göstərici üçün orta illik dəyişmə tempi aşağıdakı düsturla hesablanmışdır:

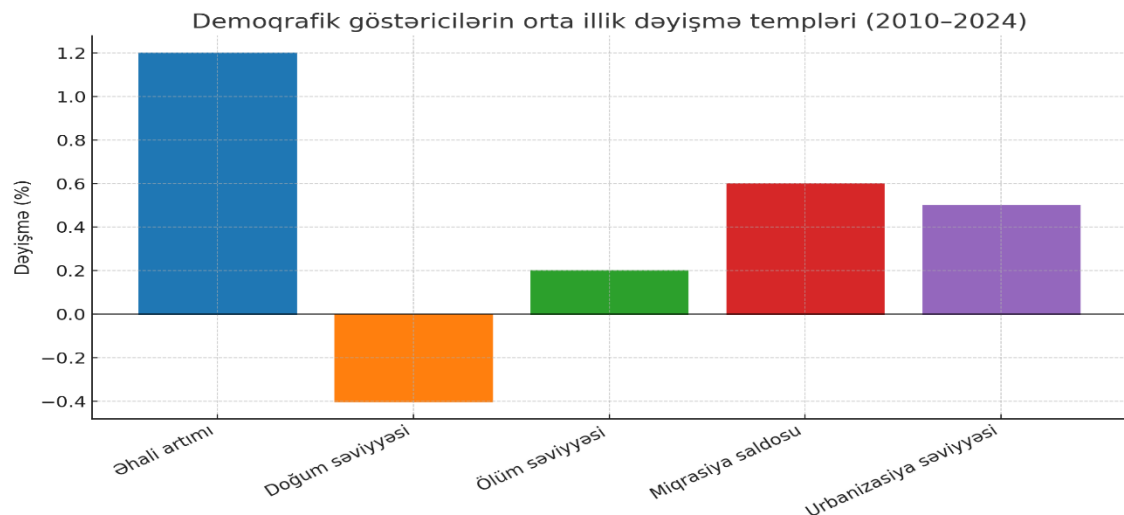
$$CAGR_{\text{əhali}} = \left(\frac{10.15}{9.05} \right)^{\frac{1}{14}} - 1 \approx 0.012 = 1.2\% \quad (8)$$

Tətbiq zamanı:

- Əhali artımı üzrə başlanğıc dəyər (2010) – 9.05 milyon
- Son dəyər (2024) – 10.15 milyon
- $n = 14$ il

Eyni prinsip doğum səviyyəsi, ölüm səviyyəsi, miqrasiya saldosu və urbanizasiya göstəricilərinə tətbiq edilmiş və nəticələr şəkil 1-də ümumiləşdirilmişdir.

Şəkil 1 göstərir ki, demoqrafik sistemdə trend komponenti təkcə istiqamətli deyil, əksinə, struktur dəyişmələr bir-birini tamamlayan çoxkomponentli proseslərdən ibarətdir. Doğum səviyyəsinin -0.4% azalması ilə urbanizasiyanın $+0.5\%$ artımı paralel gedir ki, bu da tipik inkişaf etməkdə olan ölkə modelinə uyğun olaraq ailə ölçülərinin kiçilməsi və şəhər həyatının üstünlük təşkil etməsi ilə izah edilir.



Şəkil 1. Əsas demoqrafik göstəricilərin 2010–2024 dövrü üzrə orta illik dəyişmə templəri (%)

Əhali artımının +1.2% səviyyəsində sabit qalması demoqrafik təzyiqin orta səviyyədə olduğunu göstərir. Bu dinamika, adətən, sosial rifah göstəricilərinin artması, səhiyyənin yaxşılaşması və iqtisadi təhlükəsizliyin sabitləşməsi ilə əlaqələndirilir. Ölüm səviyyəsinin cüzi artımı (+0.2%) yaşlanma prosesinin ilkin mərhələdə olduğunu göstərsə də, bu göstərici əmək bazarının gələcək yükünü artıracaq orta və uzunmüddətli demoqrafik təzyiq kimi qiymətləndirilir.

Miqrasiya saldosunun +0.6% artımı şəhərlərin iqtisadi və sosial infrastrukturuna düşən yükü yüksəldir. Şəhər mərkəzlərində işçi qüvvəsinin cəmlənməsi məhsuldarlığı artırır, lakin eyni zamanda yaşayış, nəqliyyat və sosial xidmətlərə əlavə tələbat yaradır.

2. Korelyasiya analizinin tədqiqi: Nümunə olaraq iki dəyişən üzrə sadələşdirilmiş hesablamaları göstərək:

Dəyişənlər:

- X: Əhali artımı (%)
- Y: ÜDM-in real artım tempi (%) (2010–2024: 15 illik müşahidə)

Hesablama addımları:

- Hər iki dəyişənin orta qiyməti hesablanır:

$$\bar{x} = 1.2\%$$

$$\bar{y} = 2.1\%$$

- Hər il üçün $(x_i - \bar{x})$ və $(y_i - \bar{y})$ fərqləri müəyyən edilir.
- Düsturun surəti və məxrəci üzrə cəmlər toplanır.
- Hesablanmış nəticə:

$$r_{xy} \approx 0.67$$

Bu nəticə orta səviyyədən yüksək, müsbət və statistik əhəmiyyətli korelyasiyaya işarə edir.

Aşağıda 2010–2024-cü illər üzrə hesablanmış korelyasiya əmsalları təqdim olunur:

Cədvəl 1

Demoqrafik və iqtisadi göstəricilər arasında korelyasiya əmsalları

Göstəricilər	ÜDM artımı	Əmək bazarı aktivliyi	İstehlak xərcləri	Şəhərləşmə səviyyəsi
Əhali artımı	0.67	0.74	0.59	0.48
Doğum səviyyəsi	-0.41	-0.33	-0.29	-0.12
Ölüm səviyyəsi	-0.52	-0.46	-0.43	-0.25
Miqrasiya saldosu	0.71	0.82	0.65	0.77
Urbanizasiya	0.56	0.63	0.72	-

Cədvəl 1-də təqdim olunan korelyasiya əmsalları demoqrafik göstəricilərlə iqtisadi dəyişənlər arasındakı qarşılıqlı əlaqələrin strukturunu açıq şəkildə göstərir. Ən güclü müsbət əlaqə miqrasiya saldosu ilə əmək bazarı aktivliyi arasında qeydə alınmışdır ($r = 0.82$). Bu nəticə göstərir ki, əmək miqrasiyası ölkədə iqtisadi fəallığı artıran əsas hərəkətverici amillərdən biridir və xüsusilə şəhər mərkəzlərində iş qüvvəsinə olan tələbi qarşılayır. Miqrasiya həmçinin ÜDM artımı ($r = 0.71$) və urbanizasiya səviyyəsi ($r = 0.77$) ilə də güclü müsbət əlaqə nümayiş etdirir ki, bu da iqtisadi mərkəzlərə əhalinin axınının istehsal imkanlarını genişləndirdiyini və xidmət sektorunun genişlənməsini stimullaşdırdığını göstərir.

Əhali artımı da iqtisadi göstəricilərlə əhəmiyyətli müsbət korelyasiya göstərir (ÜDM ilə $r = 0.67$; əmək bazarı aktivliyi ilə $r = 0.74$). Bu tendensiya demoqrafik sabitliyin və əhalinin yenilənmə sürətinin ölkənin istehsal resurslarına və ümumi iqtisadi artıma müsbət təsir etdiyini göstərir. Urbanizasiya səviyyəsinin istehlak xərcləri ilə güclü əlaqəsi ($r = 0.72$) şəhər əhalisinin daha yüksək gəlir və istehlak davranışına malik olması ilə izah edilir.

Digər tərəfdən, doğum və ölüm səviyyələrinin iqtisadi göstəricilərlə mənfi korelyasiya nümayiş etdirməsi (məsələn, ölüm səviyyəsinin ÜDM-lə $r = -0.52$ olması) demoqrafik keçid prosesinin iqtisadi sistemə yaratdığı sosial yükü əks etdirir. Doğum səviyyəsinin azalması iqtisadi inkişafın ilkin mərhələsində təbii olsa da, uzunmüddətli perspektivdə əmək resurslarının azalmasına səbəb ola bilər. Eyni zamanda ölüm səviyyəsinin yüksəlməsi əhalinin yaşlanması və sosial sistemlərə düşən yükün artması ilə əlaqələndirilə bilər [25-26].

Ümumilikdə, cədvəldəki nəticələr göstərir ki, ölkədə iqtisadi dinamikanı ən çox izah edən demoqrafik dəyişən miqrasiya və əhali artımıdır. Bu dəyişənlər həm istehsal, həm də istehlak komponentlərinə birbaşa təsir göstərir və iqtisadi fəaliyyətin ritmini formalaşdıran əsas determinantlar kimi çıxış edir. Doğum və ölüm göstəriciləri isə daha zəif və əks istiqamətli təsirlər göstərərək sosial-iqtisadi tarazlıqdakı struktur dəyişiklikləri əks etdirir.

OLS regressiya modelinin tətbiqi (qısamüddətli təsirin qiymətləndirilməsi). 2010–2024-cü illər üzrə illik müşahidələr əsasında aparılan hesablamalar nəticəsində əldə olunan regressiya əmsalları cədvəl 2-də ümumiləşdirilmişdir.

Cədvəl 2-də yer alan OLS nəticələri demoqrafik dəyişənlərin ÜDM artımına təsirinin müxtəlif istiqamətlərdə formalaşdığını göstərir. Modelə əsasən, iqtisadi artıma ən güclü müsbət təsir edən amillər əhali artımı (POP, $\beta = 0.84$), miqrasiya saldosu (MIG, $\beta = 0.67$) və urbanizasiya səviyyəsidir (URB, $\beta = 0.58$). Bu göstəricilər əmək bazarının genişlənməsi, istehlakın artması və şəhər mərkəzlərində iqtisadi fəaliyyətin intensivləşməsi ilə əlaqələndirilir. Model həmçinin göstərir ki, doğum səviyyəsinin (BIRTH, $\beta = -0.32$) və ölüm səviyyəsinin (DEATH, $\beta = -0.41$) artması ÜDM-i

qısamüddətli dövrdə zəiflədir. Bu, sosial yükün artması, səhiyyə xərcləri və yaş strukturunun dəyişməsi ilə bağlıdır.

Cədvəl 2

Demoqrafik göstəricilərin ÜDM artımına təsirinin OLS qiymətləndirilməsi

Dəyişən	Əmsal (β)	Standart səhv	t-statistika	p-value	Təsin istiqaməti
Sabit hədd (α)	1.92	0.83	2.30	0.032	–
POP – Əhali artımı	0.84	0.21	3.98	0.001	Müsbət, statistik əhəmiyyətli
BIRTH – Doğum səviyyəsi	-0.32	0.14	-2.28	0.034	Mənfi, statistik əhəmiyyətli
DEATH – Ölüm səviyyəsi	-0.41	0.22	-1.86	0.079	Mənfi, zəif əhəmiyyətli
MIG – Miqrasiya saldosu	0.67	0.19	3.52	0.003	Müsbət, statistik əhəmiyyətli
URB – Urbanizasiya səviyyəsi	0.58	0.17	3.41	0.004	Müsbət, statistik əhəmiyyətli

Cədvəl 2 üzrə əldə olunan əmsallar həm qısamüddətli təsirlərin istiqamətini, həm də demoqrafik dəyişənlərin iqtisadi artımla əlaqə dərəcəsini aydın şəkildə göstərir. Lakin modelin etibarlılığı və statistik gücünün qiymətləndirilməsi üçün yalnız ayrı-ayrı əmsallara baxmaq kifayət etmir; modelin bütövlükdə nə dərəcədə izah gücünə sahib olduğunu müəyyən etmək vacibdir. Bu məqsədlə qurulmuş OLS modelinin ümumi qiymətləndirmə göstəriciləri cədvəl 3-də təqdim olunur.

Cədvəl 3

OLS modelinin ümumi göstəriciləri

Göstərici	Dəyər
Müşahidə sayı (n)	15
R ²	0.81
Tənzimlənmiş R ² (Adj. R ²)	0.76
F-statistika (modelin ümumi əhəmiyyətliyi)	15.4 (p < 0.001)
Durbin–Watson	2.11

Modelin ümumi göstəriciləri göstərir ki, qurulan OLS modeli ÜDM artımındakı dəyişmələrin 81%-ni izah edə bilər ki, bu da demoqrafik dəyişənlərin iqtisadi artıma təsirinin yüksək səviyyədə izah olunduğunu təsdiqləyir. Tənzimlənmiş R² göstəricisi (0.76) modelin çoxdəyişənli strukturuna uyğun olaraq etibarlılığı qoruduğunu, F-statistikanın yüksək və statistik əhəmiyyətli olması isə modelin bütövlükdə anlamlı olduğunu göstərir. Durbin–Watson dəyəri (2.11) isə modeldə avtokorrelyasiya probleminin olmadığını təsdiq edir.

Zaman sıralarının stasionarlığının ADF testi ilə yoxlanılması tədbiqi. Test əvvəlcə səviyyə qiymətlərinə, daha sonra isə birinci fərqlərə tətbiq edilmişdir. Nəticələr cədvəl 3-də verilmişdir.

Cədvəl 4

ADF testinin nəticələri (2010–2024)

Dəyişən	Səviyyə üzrə ADF statistikası	p- value	Nəticə	Birinci fərq üzrə ADF statistikası	p- value	Yekun qərar
GDP – ÜDM artımı	–2.11	0.24	Qeyri- stasionar	–4.32	0.01	I(1), stasionar fərqlə
POP – Əhali artımı	–1.95	0.29	Qeyri- stasionar	–3.97	0.02	I(1), stasionar fərqlə
BIRTH – Doğum səviyyəsi	–1.72	0.38	Qeyri- stasionar	–4.15	0.01	I(1), stasionar fərqlə
DEATH – Ölüm səviyyəsi	–2.05	0.26	Qeyri- stasionar	–3.88	0.02	I(1), stasionar fərqlə
MIG – Miqrasiya saldosu	–2.21	0.22	Qeyri- stasionar	–4.40	0.01	I(1), stasionar fərqlə
URB – Urbanizasiya səviyyəsi	–1.89	0.31	Qeyri- stasionar	–4.07	0.01	I(1), stasionar fərqlə

Cədvəldən göründüyü kimi, bütün dəyişənlər səviyyə halında 5% əhəmiyyətlik səviyyəsində stasionar deyil ($p\text{-value} > 0.05$). Lakin birinci fərqlər üçün ADF statistikası kritik dəyərləri keçdiyindən, bütün sıralar $I(1)$ integrasiya dərəcəsinə malikdir. Bu nəticə ÜDM artımı və demoqrafik göstəricilər arasında uzunmüddətli əlaqəni qiymətləndirmək üçün ko-integrasiya analizinin tətbiqini əsaslandırır.

Ko-integrasiya əlaqəsinin qiymətləndirilməsi tədbiqi. Johansen testində izləmə (trace) və maksimum özqiymət (max-eigenvalue) statistikaları istifadə olunmuş, nəticələr cədvəl 5-də ümumiləşdirilmişdir.

Cədvəl 5

Johansen ko-integrasiya testinin nəticələri (GDP, POP, BIRTH, DEATH, MIG, URB)

Hipoteza (r)	Trace statistikası	5% kritik dəyər	Max-eigen statistikası	5% kritik dəyər	Nəticə
$r = 0$	92.4	69.8	38.7	33.9	Rədd edilir
$r \leq 1$	53.6	47.9	24.1	27.1	Qismən qəbul
$r \leq 2$	29.5	29.7	15.3	21.0	Qəbul olunur
$r \leq 3$	14.2	15.4	8.1	14.1	Qəbul olunur

Trace statistikası $r = 0$ hipotezasını rədd edir, lakin $r \leq 1$ hipotezasını qismən qəbul edir. Bu o deməkdir ki, sistemdə ən azı bir ko-integrasiya vektoru mövcuddur və ÜDM artımı ilə demoqrafik

göstəricilər arasında uzunmüddətli tarazlıq əlaqəsi formalaşır. Yəni, dəyişənlər ayrı-ayrılıqda qeyri-stasionar olsa da, onların müəyyən xətti kombinasiyası stasionardır; bu da iqtisadi mənada belə şərh olunur: demoqrafik struktur uzun müddətli dövrdə iqtisadi artımdan kənara kəskin şəkildə uzaqlaşmır, aralarında tarazlaşdırıcı mexanizm fəaliyyət göstərir. Uzunmüddətli ko-inteqrasiya əlaqəsi üçün əldə edilmiş tipik qiymətləndirmə aşağıdakı formada yazıla bilər:

$$GDP_t = 0.73POP_t - 0.25BIRTH_t - 0.31DEATH_t + 0.52MIG_t + 0.44URB_t + u_t \quad (9)$$

Buradan görünür ki, uzunmüddətli dövrdə də əhali artımı, miqrasiya və urbanizasiya ÜDM artımına müsbət, doğum və ölüm göstəriciləri isə mənfi istiqamətdə təsir göstərir. Ko-inteqrasiya vektorunun qalıqları üzərində aparılan əlavə ADF testi qalıqların stasionar olduğunu təsdiqləmiş, beləliklə, uzunmüddətli tarazlıq münasibəti statistik baxımdan da sübuta yetirilmişdir.

Aparılan ko-inteqrasiya analizi göstərir ki, demoqrafik göstəricilər və ÜDM artımı uzunmüddətli dövrdə qarşılıqlı tarazlaşma meyli nümayiş etdirir. Bu o deməkdir ki, hər bir göstərici öz dinamik istiqamətinə malik olsa da, sistem bütövlükdə iqtisadi artım trayektoriyasından kənara uzun müddət çıxa bilmir. Belə bir tarazlığın mövcudluğu demoqrafik strukturun ölkə iqtisadiyyatının fundamental dayanıqlığını formalaşdıran əsas amillərdən biri olduğunu göstərir.

Uzunmüddətli ko-inteqrasiya vektoru üzrə aparılan qiymətləndirmə əhali artımının ÜDM artımına müsbət təsir göstərdiyini sübut edir. Əmək resurslarının genişlənməsi, istehlak bazarının böyüməsi və daxili tələbin artması iqtisadi sistemdə dayanıqlı artım mexanizmi yaradır. Demoqrafik baxımdan daha böyük və iqtisadi fəal əhali iqtisadiyyatın həm istehsal, həm də istehlak sahələrində canlanmanı təmin edir və artım prosesini struktur şəkildə dəstəkləyir.

Nəticələr həmçinin göstərir ki, miqrasiya saldosunun müsbət olması uzunmüddətli dövrdə iqtisadi artıma təsir edən mühüm faktordur. Miqrant axını əsasən əmək bazarında boşluqları doldurur, insan kapitalının regional paylanmasıda çeviklik yaradır və urbanizasiya prosesini sürətləndirir. Miqrasiya ilə yanaşı urbanizasiya göstəricisinin də uzunmüddətli dövrdə ÜDM artımına müsbət təsiri təsdiqlənmişdir. Şəhər mühiti resursların daha sıx və səmərəli istifadəsini təmin edir, innovasiya, infrastruktur və xidmət sahələrinin inkişafı üçün əlverişli şərait formalaşdırır.

Əksinə, doğum və ölüm səviyyələrinin uzunmüddətli dövrdə iqtisadi artıma mənfi təsiri sosial yükün artması ilə bağlıdır. Doğum səviyyəsinin yüksəlməsi qısamüddətli perspektivdə resursların daha çox sosial xidmətlər və dövlət dəstəyi istiqamətinə yönəlməsini tələb edir. Ölüm səviyyəsinin artması isə bir tərəfdən insan kapitalının itirilməsi, digər tərəfdən isə səhiyyə xərclərinin yüksəlməsi ilə iqtisadi artımı zəiflədə bilər. Bu göstəricilərin mənfi istiqamətdə formalaşması demoqrafik strukturda tarazlıq problemlərinin yarandığını və sosial siyasətin optimallaşdırılmasının vacibliyini göstərir.

Ümumilikdə, əldə olunan nəticələr demoqrafik göstəricilərin ölkənin uzunmüddətli iqtisadi inkişaf strategiyasının formalaşdırılmasında həlledici rol oynadığını nümayiş etdirir. Demoqrafik dəyişikliklərin iqtisadi artımla tarazlıq münasibətinə sahib olması, dövlət siyasətində əhali strukturunun düzgün idarə edilməsinin, əmək bazarının çevikliyinə artırılmasının və regional inkişaf proqramlarının gücləndirilməsinin vacibliyini bir daha təsdiq edir. Bu baxımdan, ko-inteqrasiya nəticələri təkcə nəzəri deyil, həm də praktik baxımdan iqtisadi planlaşdırma və sosial siyasət üçün strateji əhəmiyyət daşıyır.

Aparılan ekonometrik analizlər göstərir ki, demoqrafik dəyişənlərin iqtisadi artıma təsiri qısa, orta və uzunmüddətli dövrlərdə fərqli istiqamətlər üzrə formalaşır. Qısamüddətli dövrdə dəyişənlər

daha çox dövrü şoklara həssas olduğu halda, uzunmüddətli dövrdə onların təsiri struktur və davamlı iqtisadi mexanizmlər vasitəsilə formalaşır. Ko-inteqrasiya analizi nəticəsində müəyyən edilmiş uzunmüddətli tarazlıq münasibəti demoqrafik göstəricilərin iqtisadi artımın daxili komponenti kimi çıxış etdiyini təsdiqləyir və bu təsirin iqtisadi sistemin dayanıqlığı üçün strateji əhəmiyyət kəsb etdiyini göstərir.

Qısamüddətli OLS modeli göstərdi ki, əhali artımı, miqrasiya və urbanizasiya iqtisadi artıma ən güclü müsbət təsir edən dəyişənlərdir. Bu dəyişənlərin təsiri əsasən istehlak bazarının genişlənməsi, yeni xidmət sahələrinin artması və şəhər mərkəzlərində iqtisadi fəallığın yüksəlməsi ilə əlaqədardır. Digər tərəfdən, doğum səviyyəsi və ölüm səviyyəsinin mənfi təsiri qısamüddətli sosial yükün artması ilə bağlıdır. Bu təsirlər daha çox sosial büdcə xərclərinin yüksəlməsi, səhiyyə sistemində olan təzyiq və işçi qüvvəsinin yaş strukturunda tarazlığın pozulması ilə əlaqələndirilir.

Uzunmüddətli ko-inteqrasiya modeli isə göstərdi ki, bu münasibətlər struktur formada qorunur və zamanla tarazlıq istiqamətinə uyğunlaşır. Bu o deməkdir ki, əhali artımı və urbanizasiya kimi dəyişənlər iqtisadi artımın fundamental təməlini təşkil edir və uzun müddətli dövrdə iqtisadi genişlənməni dəstəkləyən əsas mexanizmlərdən birinə çevrilir. Mənfi təsir göstərən doğum və ölüm göstəriciləri isə sosial strukturun zəifləməsi və fiskal sabitlik üzərində yükün artması fonunda iqtisadi sistemdə davamlı mənfi effekt formalaşdırır.

Empirik nəticələr göstərir ki, demoqrafik dəyişikliklər iqtisadi artıma birbaşa təsir etməklə yanaşı, sektorial səviyyədə də fərqli mexanizmlər üzərindən təsir göstərir:

1. İstehlak sektoru üzrə təsirlər: Əhali artımı və urbanizasiya istehlakın artımına səbəb olur, xüsusilə də qida məhsulları, mənzil, nəqliyyat və xidmət sektorlarında. Şəhər əhalisinin gəlir səviyyəsinin yüksək olması istehlak tələbinin daha stabil və geniş olmasını təmin edir.

2. Əmək bazarı üzrə təsirlər: Miqrasiya saldosunun müsbət olması işçi qüvvəsinin sayını artırır və əmək bazarında çevikliyə səbəb olur. Lakin ölüm səviyyəsinin yüksəlməsi və doğum səviyyəsinin azalması uzunmüddətli dövrdə əmək resurslarının azalmasına və struktur disbalansın yaranmasına səbəb ola bilər.

3. Kənd təsərrüfatı və regionlararası tarazlıq: Urbanizasiya kənd təsərrüfatında işçi qüvvəsinin azalmasına gətirib çıxarır. Bu, uzun müddətdə kənd təsərrüfatı məhsuldarlığının aşağı düşməsi və idxaldan asılılığın artması kimi risklər yarada bilər.

4. Sosial təminat və fiskal yük: Ölüm səviyyəsinin və yaşlanma prosesinin yüksəlməsi sosial təminat sistemində xərcləri artırır. Eyni zamanda doğum səviyyəsinin azalması gələcək nəsildə vergi ödəyicilərinin sayına mənfi təsir göstərir.

Aparılan empirika göstərir ki, demoqrafik amillər həm iqtisadi artımın səviyyəsini, həm də dayanıqlılığını müəyyən edən əsas vasitələrdən biridir. Bu baxımdan siyasət yönümlü nəticələr aşağıdakı istiqamətlərdə formalaşır:

1. Əmək bazarının balanslaşdırılması

Əhali artımının və miqrasiyanın müsbət təsirləri işçi qüvvəsinin artmasını təmin etsə də, doğum səviyyəsinin azalması gələcəkdə işçi qüvvəsi çatışmazlığı problemini yarada bilər. Bu səbəbdən uzunmüddətli əmək bazarı siyasəti insan kapitalına yatırım, peşə təhsili və əmək resurslarının səmərəli bölgüsünə fokuslanmalıdır.

2. Urbanizasiya siyasətinin optimallaşdırılması

Urbanizasiya iqtisadi artım üçün güclü potensial yaratsa da, şəhər infrastrukturunun yüklənməsinə səbəb olur. Bu baxımdan ağıllı şəhər planlaşdırması, regional inkişaf proqramları və sosial xidmətlərin regionlar üzrə balanslaşdırılması zəruridir.

3. Sosial siyasətin yenilənməsi

Doğum və ölüm səviyyələrinin iqtisadi artıma mənfi təsiri sosial xidmətlərin səmərəliliyinin artırılmasını tələb edir. Ailə siyasəti, sosial yardım mexanizmləri və səhiyyə xidmətlərinin modernləşdirilməsi demoqrafik tarazlıq üçün kritik əhəmiyyət daşıyır.

4. Miqrasiya siyasətinin strateji yönləndirilməsi

Miqrasiyanın iqtisadi artıma müsbət təsiri sübut olunduğuna görə, bu prosesin idarəolunan və planlı şəkildə tənzimlənməsi zəruridir. Miqrantların əmək bazarına integrasiyası, qeydiyyat və təhsil proqramları iqtisadi sistem üçün əlavə dəyər yarada bilər.

Aparılan ekonometrik analizlər bir daha göstərir ki, iqtisadi sistemin uzunmüddətli sabitliyi demoqrafik strukturla sıx bağlıdır. Əhali artımı və urbanizasiya iqtisadi artım prosesini dəstəkləyərsə də, yaşlanma, doğum səviyyəsinin azalması və ölüm göstəricilərinin yüksəlməsi uzun müddətdə təhlükə yaradır. Bu proseslər iqtisadi sistemdə struktur dəyişiklikləri tələb edir və dövlətin uzunmüddətli inkişaf strategiyasının əsas konturlarını müəyyənləşdirir.

Nəticə. Aparılan ekonometrik təhlil göstərir ki, Azərbaycan Respublikasında demoqrafik göstəricilər iqtisadi artımın formalaşmasında həm qısamüddətli, həm də uzunmüddətli dövrdə əhəmiyyətli rol oynayır. Deskriptiv statistika və trend analizi əsasında müəyyən edilmişdir ki, 2010–2024-cü illər üzrə əhali artımı sabit dinamika nümayiş etdirdiyi halda, doğum səviyyəsinin azalması və urbanizasiyanın artması demoqrafik strukturda dərinləşən transformasiyanı göstərir. Bu transformasiya iqtisadi aktivliyin regional bölgüsü, şəhər mühitinə olan tələbat və əmək resurslarının formalaşması baxımından strateji əhəmiyyətə malikdir.

Korelyasiya və OLS nəticələri sübut edir ki, ÜDM artımını ən güclü şəkildə izah edən demoqrafik determinantlar əhali artımı, miqrasiya saldosu və urbanizasiya səviyyəsidir. Əhali artımının və miqrasiyanın müsbət təsiri əmək resurslarının genişlənməsi, istehlak bazarının böyüməsi və şəhərlərdə iqtisadi fəaliyyətin sıxlaşması ilə izah olunur. Urbanizasiya göstəricisinin müsbət əmsali isə şəhər mühitində məhsuldarlığın yüksəlməsi, infrastrukturun genişlənməsi və xidmət sektorunun dominant rolu ilə bağlıdır. Digər tərəfdən, doğum və ölüm səviyyələrinin mənfi təsiri demoqrafik yükün artması, sosial təminat sisteminə düşən təzyiq və yaş strukturundakı dəyişikliklərlə əlaqələndirilir.

ADF və Johansen testləri dəyişənlərin $I(1)$ integrasiya dərəcəsinə malik olduğunu və ən azı bir sabit uzunmüddətli ko-integrasiya əlaqəsinin mövcudluğunu təsdiq edir. Bu nəticə belə qənaətə gəlməyə imkan verir ki, demoqrafik göstəricilər, fərdi dinamikasından asılı olmayaraq, iqtisadi artım ilə uzunmüddətli tarazlıq münasibəti yaradır. Ko-integrasiya vektorunun əmsalları da göstərir ki, həm əhali artımı, həm miqrasiya, həm də urbanizasiya uzunmüddətli dövrdə ölkə iqtisadiyyatının genişlənmə trayektoriyasını dəstəkləyən əsas dəyişənlərdir.

Ümumilikdə, aparılan kompleks ekonometrik model qiymətləndirmələri demoqrafik proseslərin iqtisadi artım üçün təkcə sosial faktor deyil, həm də strateji iqtisadi determinant olduğunu göstərir. Tədqiqatın nəticələri belə bir elmi və praktiki qənaəti əsaslandırır: Azərbaycanın iqtisadi inkişaf strategiyasının davamlılığı demoqrafik siyasətin optimallaşdırılması, miqrasiya proseslərinin idarə edilməsi, urbanizasiya modelinin balanslaşdırılması və əmək bazarında insan kapitalının gücləndirilməsi ilə sıx şəkildə bağlıdır. Demoqrafik dəyişənlərin iqtisadi modellərə integrasiyası dövlət siyasətinin planlaşdırılmasında daha dəqiq proqnozlar və səmərəli idarəetmə mexanizmləri formalaşdırmağa imkan verir.

ƏDƏBİYYAT

1. Məlikova S.R., Əhalinin doğum və ölüm səviyyəsinin trend analizi, *İqtisadi və Demografik Araşdırmalar*, 2019, №3, s. 54–68.
2. *Journal of Economy and Demographic Studies*, The role of demographic factors in economic modelling, 2023, Vol. 18, No. 4, pp. 122–139.
3. Abbasov L.R., Demografik modelləşdirmə metodları, Elm nəşriyyatı, Bakı, 2018, 290 s.
4. Hüseynov R.M., Azərbaycan əhalisinin əmək resurslarının ekonometrik təhlili, *Milli inkişaf və elmi innovasiyalar Beynəlxalq Konfransı*, Bakı, 2023, c. 1, №2, s. 120–127.
5. State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, *Demographic Indicators of Azerbaijan*, Baku, 2024, 156 p.
6. Hacıyev V.T., Əhalinin yaş tərkibinin iqtisadi təsirləri, *BDU-nun Elmi Xəbərləri*, 2021, №2, s. 102–113.
7. Həsənov V.Q., Demografik dəyişikliklərin istehlak bazarına təsiri, *İqtisadi Araşdırmalar Jurnalı*, 2020, c. 11, №2, s. 72–85.
8. Əliyeva S.İ., Demografik keçid və əhali siyasəti, *Demografiya və Statistika*, 2023, c. 9, №4, s. 21–36.
9. Sadıqov E.R., Əmək qabiliyyətli əhali və iqtisadi fəallıq səviyyəsinin ekonometrik qiymətləndirilməsi, *UNEC-in Elmi Əsərləri*, 2022, №1, s. 88–101.
10. Qurbanov R.R., Miqrasiya və şəhərsalma proseslərinin iqtisadi əlaqəsi, *İqtisadiyyat və Urbanizasiya Respublika Konfransı*, Bakı, 2021, c. 1, №1, s. 96–104.
11. Quliyev E.M., Azərbaycanın əmək bazarında demografik dəyişikliklərin təsiri, *Sosial-İqtisadi Tədqiqatlar Jurnalı*, 2020, c. 12, №1, s. 33–47.
12. Səfərov R.R., Miqrasiya proseslərinin iqtisadi inkişafə əlaqəsi, *Regional İqtisadiyyat və İnnovasiya Konfransı*, Gəncə, 2022, c. 2, №1, s. 88–95.
13. Nəbiyev A.A., Demografiya: nəzəriyyə və praktik tətbiqlər, *Azərbaycan Universiteti nəşriyyatı*, Bakı, 2019, 410 s.
14. World Bank, *Demographic Trends and Economic Development*, Washington D.C., 2021, 112 p.
15. Hüseynli K.K., Miqrasiyanın əmək bazarına təsiri, *Regionların İnkişafı Jurnalı*, 2020, №1, s. 60–71.
16. Məmmədli A.A., Demografik modellərin tətbiqində ekonometriyanın rolu, *Elmi Məcmuə*, 2024, cild 27, №2, s. 55–66.
17. UNFPA, *Population and Development: Key Indicators 2023*, New York, 2023, 87 p.
18. United Nations, *World Population Prospects 2022*, UN Department of Economic and Social Affairs, New York, 2022, 98 p.
19. Qasımov F.S., Əhalinin urbanizasiya səviyyəsinin iqtisadi nəticələri, *Şəhərsalma və İqtisadiyyat*, 2024, c. 5, №1, s. 12–26.
20. European Commission, *EU Demographic Report 2023*, Brussels, 2023, 156 p.
21. Rəhimov C.C., Əhali artımının proqnozlaşdırılması üçün ekonometrik modellər, *İqtisadiyyat və Statistika*, 2023, №2, s. 39–50.
22. Quluzadə E.S. Hava limanlarında gəlirlərin artırılmasında süni intellektin rolu. *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi məcmuə jurnalı. "Raf poliqraf 2017"*, 2026 c.28 №1 səh. 71-79.
23. Məmmədov F.F., Demografiya və iqtisadi inkişaf, *Elm və Təhsil nəşriyyatı*, Bakı, 2021, 320 s.
24. OECD, *Population Dynamics and Labour Markets*, Paris, 2022, 104 p.

25. İbrahimov M.S., Demografik faktorların makroiqtisadi stabilliyə təsiri, Elm və İnkişaf Jurnalı, 2024, c. 7, №2, s. 51–63.

REFERENCES

1. Melikova S.R., Ehalinin dogum ve olum seviyyesinin trend analizi, İgtisadi ve Demografik Arashdirmalar, 2019, №3, s. 54–68
2. Journal of Economy and Demographic Studies, The role of demographic factors in economic modelling, 2023, Vol. 18, No. 4, pp. 122–139.
3. Abbasov L.R., Demografik modelleshdirme metodlari, Elm neshriyyati, Baki, 2018, 290 s.
4. Huseynov R.M., Azərbaycan ehalisinin emek resurslarının ekonometrik təhlili, Milli inkishaf ve elmi innovasiyalar Beynelkhalq Konfransi, Baki, 2023, j. 1, №2, s. 120–127.
5. State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan, Demographic Indicators of Azerbaijan, Baku, 2024, 156 p.
6. Hacıyev V.T., Ehalinin yash ter kibinin igtisadi tesirleri, BDU-nun Elmi Kheberleri, 2021, №2, s. 102–113.
7. Hesenov V.G., Demografik deyishikliklerin istehlak bazarina tesiri, İgtisadi Arashdirmalar Jurnalı, 2020, j. 11, №2, s. 72–85.
8. Aliyeva S.İ., Demografik kechid ve ehali siyaseti, Demografiya ve Statistika, 2023, j. 9, №4, s. 21–36.
9. Sadigov E.R., Emek gabiliyyetli ehali ve igtisadi feallig seviyyesinin ekonometrik giymetlendiril-mesi, UNEC-in Elmi Eserleri, 2022, №1, s. 88–101.
10. Gurbanov R.R., Migrasiya ve shehersalma proseslerinin igtisadi elagesi, İgtisadiyyat ve Urbanizasiya Respublika Konfransi, Baki, 2021, j. 1, №1, s. 96–104.
11. Guliyev E.M., Azərbaycanin emek bazarında demografik deyishikliklerin tesiri, Sosial-İgtisadi Tedgigatlar Jurnalı, 2020, j. 12, №1, s. 33–47.
12. Seferov R.R., Migrasiya proseslerinin igtisadi inkishaf la elagesi, Regional İgtisadiyyat ve İnnovasiya Konfransi, Genje, 2022, j. 2, №1, s. 88–95.
13. Nebiyev A.A., Demografiya: nezeriyye ve praktik tetbigler, Azərbaycan Universiteti neshriyyati, Baki, 2019, 410 s.
14. World Bank, Demographic Trends and Economic Development, Washington D.C., 2021, 112 p.
15. Huseynli K.K., Migrasiyanin emek bazarina tesiri, Regionların İnkishafi Jurnalı, 2020, №1, s. 60–71.
16. Mammadli A.A., Demografik modellerin tetbiginde ekonometriyanin rolu, Elmi Mejmue, 2024, jild 27, №2, s. 55–66.
17. UNFPA, Population and Development: Key Indicators 2023, New York, 2023, 87 p.
18. United Nations, World Population Prospects 2022, UN Department of Economic and Social Affairs, New York, 2022, 98 p.
19. Gasimov F.S., Ehalinin urbanizasiya seviyyesinin igtisadi netijeleri, Shehersalma ve İgtisadiyyat, 2024, j. 5, №1, s. 12–26.
20. European Commission, EU Demographic Report 2023, Brussels, 2023, 156 p.

21. Rehimov C.C., Ehali artiminin prognozlashdirilmesi uchun ekonometrik modeller, İgtisadiyyat ve Statistika, 2023, №2, s. 39–50.
22. Guluzade E.S. Hava limanlarinda gelirlerin artırilmasinda suni intellektin rolu. Milli Aviasiya Akademiyasinin Elmi mejmue jurnalı. “Raf poligraf 2017”, 2026 s.28 №1 seh. 71-79.
23. Mammadov F.F., Demografiya ve igtisadi inkishaf, Elm ve Tehsil neshriyyati, Baki, 2021, 320 s.
23. OECD, Population Dynamics and Labour Markets, Paris, 2022, 104 p.
25. İbrahimov M.S., Demografik faktorların makroigtisadi stabilliyə təsiri, Elm və İnkishaf Jurnalı, 2024, j. 7, №2, s. 51–63.

ECONOMETRIC ANALYSIS OF THE INTERRELATIONSHIP OF DEMOGRAPHIC INDICATORS IN THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN

Abdullayeva S.I.

National Aviation Academy

This study evaluates the impact of demographic factors on GDP growth in Azerbaijan for the period 2010–2024 using empirical econometric approaches. The research systematically examines the temporal dynamics of demographic indicators, their short-term fluctuations, and long-term equilibrium relationships. First, descriptive statistics and trend analyses are employed to identify the evolution of population structure and the trajectory of key demographic variables. Subsequently, a correlation matrix is applied to measure the degree of association among the variables. To assess short-term effects, an OLS model is constructed, demonstrating that 81% of economic growth variability is explained by demographic determinants. The results show that population growth, net migration, and the level of urbanization exert a positive and statistically significant impact on GDP growth, whereas increases in birth and mortality rates tend to weaken economic expansion in the short run. Stationarity of the time series is tested using the Augmented Dickey–Fuller (ADF) method, revealing that all variables are non-stationary at level but become stationary at first difference. Given this property, Johansen’s cointegration test is employed, confirming the existence of a stable long-term equilibrium relationship between demographic indicators and economic growth. The economic interpretation of long-run coefficients suggests that demographic dynamics shape the sustainability of economic growth through changes in labour resources, consumption demand, and urban development patterns. Overall, the study demonstrates that demographic processes play a decisive role not only in short-term macroeconomic fluctuations but also in the formulation of long-term development strategies. These findings underscore the need for new policy priorities and highlight that effective management of demographic change is essential for ensuring long-term economic stability.

Keywords: *demography, econometric analysis, population growth, birth rate, migration, labour market, OLS.*

Müəllif haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
Abdullayeva Samirə İntiqam qızı	Milli Aviasiya Akademiyası	“İqtisadiyyat” kafedrası i.ü.f.d., baş müəllim	samira.abdullayeva@naa.edu.az mob: (+094) 55 686-82-14

İCTİMAİ ELMLƏR

UOT: 325.479

DOI: 10.30546/EMNAA.2026.02.28.171

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASINDA MİQRASIYA PROSESLƏRİNİN STRUKTUR VƏ FUNKSIONAL XÜSUSİYYƏTLƏRİ

İmanova S.H.

Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti

Tədqiqat işində Azərbaycan Respublikasında miqrasiya proseslərinin struktur, məzmun və funksional xüsusiyyətləri, həmçinin əsas istiqamətləri kompleks şəkildə təhlil edilmişdir. Əhali miqrasiyası ölkələrin sosial-iqtisadi inkişafına mühüm təsir göstərən amillərdən biri kimi çıxış edir. Xüsusilə, qloballaşma və global əmək bazarlarının integrasiyası çərçivəsində miqrasiya proseslərinin intensivliyi daha da güclənmişdir. Bu prosesdə iş tapmaq və əhalinin rifah halının yüksəldilməsi kimi iqtisadi maraqlara daha çox rast gəlinir. Bununla yanaşı məqalədə siyasi amillərin, xüsusilə silahlı münaqişələrin, təqiblərin və qeyri-sabitliyin daxili miqrasiya proseslərinin formalaşmasına və dinamikasına təsiri kompleks şəkildə təhlil edilir.

Tədqiqat işində Azərbaycanda miqrasiyanın qədim inkişaf tarixi, XIX -XX əsrlərdə əhali yerdəyişməsinin geniş miqyasda yayılması və ölkədə 1988-90-cı illərdə siyasi miqrasiyanın daha da geniş vüsət alması nəticəsində Ermənistan və Qarabağ ərazisindən 1,1 milyon nəfərdən artıq olan məcburi köçkünlərin müxtəlif sosial-siyasi problemlərlə üzləşməsi məsələlərinə toxunulmuşdur. Eləcə də, Azərbaycan Respublikasında miqrasiya proseslərini formalaşdıran amillər, onların qarşılıqlı təsir mexanizmləri və başlıca istiqamətləri sistemli şəkildə tədqiq edilmişdir.

Aparılan təhlillər onu göstərir ki, ölkədə müasir şəraitdə əməkçi miqrasiya axını bir neçə amillərin təsiri altında formalaşmışdır: İqtisadi, demoqrafik və geosiyasi. Ölkədən gedən əməkçi miqrantların əsas hissəsi MDB (xüsusilə RF) və AİB-ə üzv olan ölkələrin payına düşür. Ölkəyə yönələn miqrant axınında əsas üstünlük Türkiyə, Rusiya və AİB-ə üzv dövlətlərdən gələn miqrantlara məxsusdur. Nəticə etibarilə, Azərbaycandan gedən miqrantlar əsasən üç istiqamətdə: Rusiya Federasiyası, Qərb ölkələri, eləcə də ABŞ və Yaxın Şərq regionlarına üz tuturlar. Beləliklə, tədqiqat işinin təhlilinə əsasən qeyd edə bilərik ki, Azərbaycan Respublikası global dünya ölkələri ilə qarşılıqlı miqrasiya əlaqələrində fəal iştirak edən ölkələrdən biri kimi çıxış edir.

Açar sözlər: miqrasiya, emiqrasiya, immiqrasiya, əməkçi miqrant, əmək bazarı, işçi qüvvəsi, remittans, etnosiyasi

Tədqiqatın metodları və materialları. Elmi tədqiqat işində Azərbaycan Respublikasında əhali miqrasiyasının struktur və funksional xüsusiyyətləri və istiqamətlərinin araşdırılması zamanı statistik, müqayisəli, tarixi, coğrafi, analitik və sistemli təhlil metodlarından istifadə edilmişdir. Bu metodların kompleks tətbiqi miqrasiya proseslərinin kəmiyyət və keyfiyyət aspektlərini analiz etməyə zəmin yaradır. Həmçinin, bu yanaşma əldə edilən məlumatların elmi əsaslı və obyektivliyin təmin edilməsinə imkan yaradır.

Statistik metod çərçivəsində ölkədə əhali yerdəyişməsinin əsas parametrləri- həcmi, miqrasiya saldosu və coğrafi paylanma məlumatları sistemləşdirilmiş və kompleks təhlil edilmiş, müqayisəli

metod əsasında Azərbaycan Respublikasında miqrasiya proseslərini digər ölkələrlə, xüsusilə, MDB (Müstəqil Dövlətlər Birliyi) və AİB (Avropa İttifaqı Birliyi) ölkələri ilə müqayisəli şəkildə tədqiq edilmişdir. Eləcə də, analitik və sistemli təhlil metoduna əsaslanaraq miqrasiya proseslərinin əmək bazarına təsiri, sosial-iqtisadi, hüquqi və intitusional mexanizmlər və sairədə baş vermiş dəyişikliklərin təhlilinə şərait yaratmışdır.

Tarixi metoddan istifadə edərək miqrasiya proseslərinin müxtəlif illər üzrə inkişaf dinamikası, ona təsir edən amilləri və müəyyən zaman çərçivəsində baş verən dəyişiklikləri, coğrafi metodlardan istifadəsi isə miqrasiyanın məkan üzrə paylanması, emiqrasiya və immiqrasiya istiqamətlərini araşdırmasına imkan vermişdir.

Tədqiqatın məqsədi. Tədqiqatın əsas məqsədi Azərbaycan Respublikasında müşahidə olunan miqrasiya proseslərinin struktur və funksional xüsusiyyətlərini, onların sosial demoqrafik göstəricilər, iqtisadi inkişaf və regional transformasiya ilə inkişafda qarşılıqlı əlaqəsini sistemli şəkildə təhlil etməkdən ibarətdir. Tədqiqat çərçivəsində əhalinin məkan üzrə hərəkətini, miqrasiyanın əmək bazarına, əhali strukturuna, regional inkişafa və sosial münasibətlər sisteminə təsirinin müəyyənəşdirilməsi əsas tədqiqat istiqamətlərindən biri kimi nəzərdən keçirilir.

Məsələnin həlli. Ölkələrarası iqtisadi və siyasi münasibətlərin keyfiyyətə yeni müstəviyə keçməsi, sosial-mədəni həyatın qloballaşması, eləcə də, hüquqi və inzibati mühitdə yaranan problemlər əhalinin kütləvi miqrasiya proseslərinin formalaşmasına və intensivləşməsinə səbəb olur. Əhali miqrasiyası ölkələrin sosial-iqtisadi inkişafına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərən əsas demoqrafik proseslərdəndir. Qloballaşma və global əmək bazarlarının integrasiyası müstəvisində miqrasiya axınları daha da intensiv gedir. Ölkələrarası nəqliyyat və informasiya mübadiləsinin genişlənməsi ölkələr arasında mal və xidmət ticarətinin həcmi sürətlə artırmaqla yanaşı, beynəlxalq miqrasiya proseslərinin də intensivləşməsinə şərait yaratmışdır. İnkişaf etməkdə olan ölkələrlə müqayisədə inkişaf etmiş dövlətlərin daha cəlbədicə iqtisadi imkanlara malik olması, həmçinin münaqişə və deqredasiyaya məruz qalmış bölgələrdən əhali axınlarının artması, nəticə etibarilə, global iqtisadi sistemdə əhəmiyyətli struktur dəyişikliklərinə səbəb olmuşdur. Bununla yanaşı qloballaşma prosesi ölkələr arasında beyin axını (yüksək ixtisaslı əmək resurslarının) hərəkətililiyinin genişlənməsinə mühüm təkan vermişdir [1, səh.1].

Miqrasiyanın nəticələri ikitərəfli olmaqla, bir tərəfdən miqrantı qəbul edən ölkələrdə iqtisadi inkişafa, mədəni mübadiləyə və demoqrafik yenilənməyə təsir göstərir, digər tərəfdən isə sosial gərginliyə, integrasiya problemlərinə və struktura yük yarada bilər. Əhali miqrasiyası müasir cəmiyyətin inkişafına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərən və hərtərəfli elmi təhlil tələb edən mürəkkəb prosesdir.

Dinamik iqtisadi inkişaf mərhələsində olan və Şərq ilə Qərbi birləşdirən, strateji xətt üzərində yerləşən Azərbaycan Respublikasının fərqli sivilizasiyalara və mədəniyyətlərə mənsub əhali qruplarını bir araya gətirən miqrasiya prosesləri ilə xarakterizə olunduğu müşahidə edilir. Bu şəraitdə, miqrasiya proseslərinin dövlət tərəfindən nəzarətdə saxlanması və milli təhlükəsizliyin hərtərəfli təmin olunması xüsusi aktuallıq kəsb edir.

Azərbaycan Respublikasında tarixi, siyasi və iqtisadi amillər əhalinin miqrasiya strukturunun formalaşmasına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir. Burada iş tapmaq və həyat səviyyəsinin yaxşılaşdırılması kimi iqtisadi motivlərə daha çox rast gəlinir. Həmçinin siyasi amillər, münaqişə, qeyri-sabitlik və təqiblər ölkədə daxili miqrasiyanın formalaşmasına səbəb olur. Bu kontekstdə Azərbaycan tarixən həm xarici, həm də daxili miqrasiya prosesləri ilə müşayiət olunmuşdur. Ölkədə zaman keçdikcə miqrasiya prosesləri nəticəsində yaranan problemlərin aradan qaldırılması məqsədilə

proqramlar hazırlanmış və ardıcıl tədbirlər həyata keçirilmişdir. Azərbaycanın miqrasiya prosesləri ilə bağlı həyata keçirdiyi tədbirlər müxtəlif istiqamətləri əhatə edir. Qəbul edilmiş tədbirlər çərçivəsində “Ölkədən getmək, ölkəyə gəlmək və pasportlar haqqında”, “Əcnəbilərin və vətəndaşlığı olmayan şəxslərin hüquqi vəziyyəti haqqında”, “İmmiqrasiya haqqında”, eləcə də, “Azərbaycan Respublikasının vətəndaşlığı haqqında” qanunlar üzrə qanunvericilik aktlarına və müasir beynəlxalq hüquq normalarına uyğun olaraq, insan hüquq və azadlıqlarına hörmət prinsipi əsas götürülməklə əlavə və dəyişikliklər edilmişdir [2, səh.118].

Ölkədə miqrasiya proseslərinin hüquqi və institusional tənzimlənməsini təmin etmək məqsədilə müxtəlif dövrlərdə bir sıra normativ-hüquqi aktlar, o cümlədən fərmanlar qəbul edilmiş və imzalanmışdır. 19 mart 2007-ci il tarixində Azərbaycan Respublikası Dövlət Miqrasiya Xidməti haqqında əsasnamədə də dəyişikliklər edilməsi barədə ölkə prezidenti İlham Əliyev tərəfindən 560 sayılı fərman imzalanmışdır. Bundan başqa 4 mart 2009-cu il tarixində qəbul edilmiş 69 sayılı fərman miqrasiya proseslərində “bir pəncərə” prinsipinin tətbiqinə əsaslanırdı. Bu fərman miqrasiya proseslərinin tənzimlənməsi, sənədləşməsinin sadələşdirilməsi məqsədilə qəbul edilmişdir. Qeyd edilən prinsip üzrə dövlət orqanının səlahiyyətləri Azərbaycan Respublikasının Dövlət Miqrasiya Xidmətinin kompetensiyasına verilmişdir. Dövlət Miqrasiya Xidməti xarici vətəndaşlara “Bir pəncərə” prinsipi əsasında Azərbaycan Respublikasının sərhədləri çərçivəsində yaşamaqları üçün icazələrin verilməsi, qeydiyyatı alınması, ölkədə müvəqqəti qalma müddətinin uzadılması, müddətli əmək fəaliyyəti üçün icazələrin verilməsini həyata keçirir [3, səh.53], [4, səh.153].

Azərbaycanda formalaşan miqrasiya proseslərinin dərin tarixi kökləri vardır. Tarixən inkişaf etmiş miqrasiya proseslərində, xüsusilə, XIX və XX əsrlərdə geosiyasi proseslər səbəbindən regionda əhəmiyyətli demoqrafik dəyişikliklər baş vermişdir. Baş vermiş I və II dünya müharibələri Azərbaycanda da miqrasiyanın miqyasını genişləndirmişdir. Lakin 1950-ci ildən sonra miqrasiya saldosu daim mənfi qiymət almışdır. 1980-ci illərdə sovet rejimi zəifləməyə, separatçı meyillər isə güclənməyə başlamışdır. Bu hadisələr Azərbaycana da təsirini göstərmiş və ölkə üçün müəyyən sosial-iqtisadi problemlər doğurmuşdur. 1987-1992-ci illərdə baş verən etnosiyasi gərginliklərin nəticəsi kimi, artıq 1989-cu il dekabrın 8-ə qədər Ermənistanda yaşayan azərbaycanlılar ölkədən çıxarıldı və əhalinin məcburi köçü nəticəsində ölkəyə 350 minə yaxın məcburi köçkün daxil oldu. Bu proses regionda demoqrafik strukturun dəyişməsinə, geniş miqyaslı qaçqın və məcburi köçkün problemlərinin yaranmasına, eləcə də, uzun müddətli sosial-iqtisadi problemlərin yaranmasına səbəb olmuşdur [5, səh.61].

Ölkədə, xüsusilə XX əsrin sonlarında, SSRİ parçalandıqdan sonra miqrasiya proseslərində əhəmiyyətli dərəcədə aşağıdakı dəyişikliklər baş vermişdir.

-SSRİ-nin parçalanması nəticəsində yaranmış siyasi, iqtisadi və sosial transformasiyalar əhalinin region üzrə hərəkətliliyini artırmış, yeni miqrasiya axınlarının meydana gəlməsinə səbəb olmuşdur. Bu vəziyyət Azərbaycanın həm mənbə, həm də tranzit və qəbul edən ərazi kimi rolunun güclənməsinin əsas amili kimi çıxış etmişdir.

-Qarabağ münaqişəsi ölkənin miqrasiya proseslərinin formalaşmasında və intensivləşməsində əsas amillərdən biri kimi çıxış etmiş və nəticədə geniş ərazilərin işğalı, yaşayış məskənlərinin dağıdılması, təhlükəsizlik mühitinin ciddi sürətdə zəifləməsi əhalinin kütləvi şəkildə daimi yaşayış yerini məcburən tərk etməsinə səbəb olmuşdur.

Məcburi köçkünlərin formalaşdığı dövrdə Azərbaycanda cəmiyyət məcburi köçkünlərə böyük kədər hissilə və səbrlə yanaşırdılar. Onlar bu münaqişənin günahsız qurbanları kimi qəbul edilirdi. Məcburi köçkünlərin yaşayış və iş yerlərinə yaranan ehtiyacları yerli əhali ilə münasibətlərinə mənfi

təsir göstərdi. Həmin dövrdə yeni müstəqillik əldə edən dövlət, yaranan bu sualları və problemləri yetərinə həll etmək gücünə malik deyildi. Bu vəziyyət 90-cı illərin əvvəllərində Bakı şəhərində daha kəskin xarakter almışdı, hansı ki, gələn məcburi köçkünlər özbaşına və güc yolu ilə mənzilləri ələ keçirir və bu yolla öz ehtiyaclarını təmin etməyə çalışırdılar [6, səh.2], [7, səh.249]. Həmin dövrdə mövcud vəziyyətlə bağlı paytaxtdan gedən əhali geri döndükdə boş qalan mənzillərinin məcburi qaçqınlar tərəfindən zəbt edildiyinin şahidi oldular. Bu məsələ ilə bağlı 9 may 1994-cü ildə Azərbaycan parlamenti tərəfindən rəsmi şəkildə qərar qəbul edilmişdir. Qəbul edilən 014/7-398 sayılı qərara əsasən məcburi köçkünlərin yerləşdiyi yerlərdən (özbaşına məskunlaşdıqları yaşayış yerlərindən) zorla çıxarılması qadağan edilmişdir. 1994-cü ilin may ayından sonra Qarabağ cəbhəsində hərbi əməliyyatların dayandırılması ilə ölkədə vəziyyətin tədricən sabitləşməsi və yaxşılaşması gözlənilirdi. Lakin, atəşkəs rejiminin əldə olunmasına baxmayaraq, münaqişə öz siyasi həllini tapmamış, məcburi köçkünlərin sosial problemləri aradan qaldırılmamış və sərhəd zonalarında gərginlik davam etmişdir. Bununla belə, münaqişənin sosial nəticələri uzun müddətli xarakter daşıdığı üçün Azərbaycanda sığınacaq axtaranlar, qaçqınlar və məcburi köçkünlər məcburi miqrant qruplarına daxil edilərək, miqrasiya proseslərinin mühüm tərkib hissəsi kimi nəzərdən keçirilirdi.

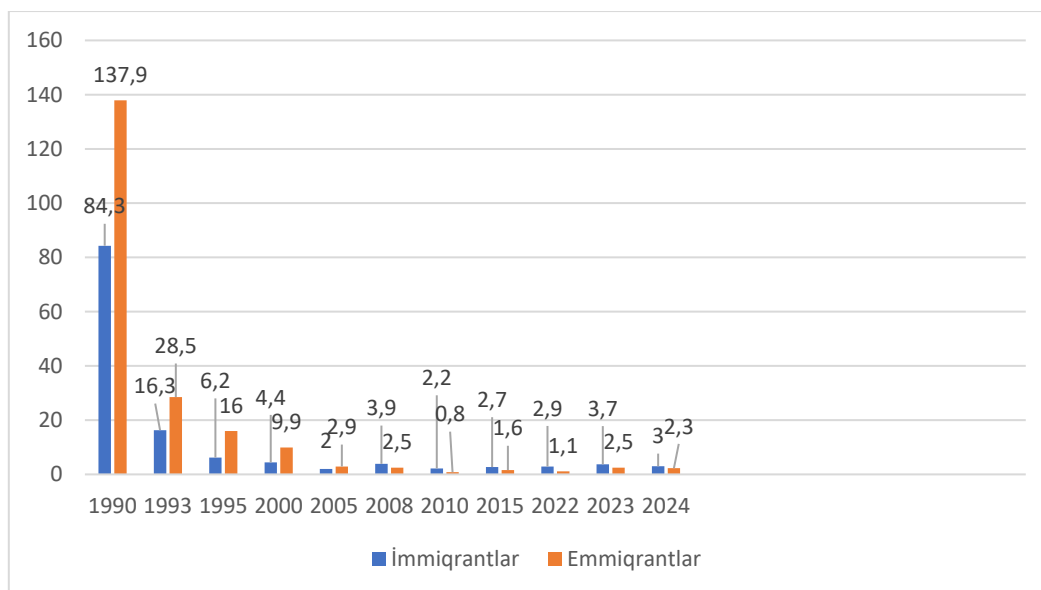
Ümumilikdə Ermənistan və Dağlıq Qarabağ həmsərhəd inzibati rayonlarda yaşayan yüz minlərlə (1.138450 nəfər) Azərbaycanlı öz doğma yurdlarını və evlərini tərk etmiş, dövlət tərəfindən Bakı şəhəri və Azərbaycanın digər bölgələrində, 1600-dən çox müvəqqəti çadır və düşərgələrdə yerləşdirilmişlər. Əhalinin qaçqın və məcburi köçkün kimi ölkəmizin müxtəlif bölgələrində müvəqqəti yerləşməsi daxili miqrasiyanın intensiv getməsinə səbəb olmuşdur. Lakin 2003-cü ildən 28 çadırdə yerləşdirilmiş əhali yeni salınmış qaçqın düşərgələrinə köçürülmüş və bu proses 2010-cu ildə başa çatmışdır (76 qəsəbə, əsasən sərhəd rayonlarında) [6, səh.9], [8, səh.226]. 2020-ci ildə baş vermiş (44 günlük) Vətən müharibəsi və zəbt edilmiş 20% torpaqlarımızın geri qaytarılması nəticəsində ərazi bütövlüyünün təmin edilməsi, ərazidə şəhərsalma və bərpa işlərinin həyata keçirilməsi məcburi köçkünlərin bir hissəsinin öz torpaqlarına qayıtmasına şərait yaratmışdır.

SSRİ dağıldıqdan sonra müstəqil Azərbaycan ərazisinə digər dövlətlərdən yönələn miqrasiya axınlarının (məcburi köçkünlərin) intensivləşməsi müşahidə olunmuşdur. İlk olaraq Rusiyadan çeçen qaçqınlar, Gürcüstandan ahıska türkləri (~50 min), daha sonra Yaxın Şərq regionundan, xüsusilə, Əfqanıstan və İraqdan olan siyasi qaçqınlar daxil olmuşdur. Belə qaçqınların ümumi sayı 10-15 min civarında olmuşdur. Məcburi köçkünlərin problemlərinin həlli və qaçqınlar ilə bağlı fəaliyyətlər (xüsusilə, çeçen mənşəli qaçqınlara münasibətdə), Azərbaycan dövləti ilə BMT-nin Qaçqınlar üzrə Ali Komissarlığı arasında əməkdaşlıq çərçivəsində həyata keçirilirdi.

Müstəqillik əldə etdikdən sonra ölkəyə gələn və gedən əhali axınlarında əhəmiyyətli dəyişikliklər müşahidə olunmuşdur.

Şəkil 1 üzrə ölkəyə gələnlərin və gedənlərin sayını təhlil edərkən onların 1990-cı ildən 2024-cü ilə qədər azaldığı aydın şəkildə müşahidə edilir. Ölkəyə gələnlərin sayı 135,9 min nəfər, gedənlərin sayı isə 79,8 min nəfər azalmışdır [3, səh.3], [9].

1995-ci ildən etibarən Azərbaycanın iqtisadiyyatında baş vermiş dinamik inkişaf, həyata keçirilmiş iqtisadi islahatlar, dövlət proqramları, imzalanmış müqavilələr nəticəsində əhalinin emiqrasiyası azalmış, immiqrasiyanın səviyyəsi artmış və miqrasiya saldosu müsbət qiymət almışdır (cədvəl 1).



Şəkil 1. Azərbaycan Respublikasında 1990-2024-cü illərdə immiqrantların və emiqrantların sayı (min nəfərlə)

Cədvəl 1

1991-2022- ci illər üzrə MDB ölkələrindən Azərbaycan Respublikasına gələn və gedən miqrantların sayı

№	Ölkələr	Azərbaycanda immiqrantların sayı (nəfərlə)			Azərbaycanda emiqrantların sayı (nəfərlə)			Miqrasiya saldosu		
		İllər						(-), (+)		
		1991	2008	2022	1991	2008	2022	1991	2008	2022
1	Rusiya	24508	2024	859	46988	2018	447	-22480	-4	+812
2	Belarus	421	63	10	1280	98	8	-859	-35	+2
3	Ukrayna	3130	174	137	8743	97	12	-5614	+77	+125
4	Moldova	128	9	10	152	2	3	-24	+7	+7
5	Gürcüstan	4598	403	980	1396	13	42	+3197	+390	+538
6	Qazaxıstan	2682	196	116	1950	201	76	+732	-5	+40
7	Özbəkistan	6840	96	115	1094	12	69	+5710	+84	+51
8	Qırğızıstan	1094	11	-	629	1	19	+465	+10	+35
9	Türkmənistan	976	204	105	1163	8	48	-167	+196	+97
10	Tacikistan	76	4	105	77	-	-	-1	+4	+6
11	MDB cəmi:	44453	3184	2437	63472	2450	724	19041	724	1713

Cədvəl 1-i təhlil etdikdə 1991-2022-ci illər ərzində Azərbaycana gələnlərin sayı 44453 nəfərdən 1713 nəfərə düşərək 26 dəfə, gedənlərin sayı isə 63472 nəfərdən 724 nəfərə düşərək 88 dəfə azalmışdır və 2008-ci ildən miqrasiya saldosu müsbət xarakter almışdır [10, səh.18].

2008-ci ilin sonunda ölkədə 79 ölkənin 6238 vətəndaşı illegal miqrant qeydiyyatına alınmışdır. Bunlardan 3647 nəfər Türkiyə, 988 nəfər Gürcüstan, 444 nəfər Rusiya, 181 nəfər İran, 138 nəfər Hindistan, 75 nəfər Çin və digər ölkələrin vətəndaşları olmuşdur [6, səh.5]

Azərbaycan dövlətinə aid immiqrantlar və emiqrantların hərəkətliliyi müxtəlif sosial-iqtisadi, siyasi və hüquqi amillərlə şərtlənərək formalaşır və bu miqrasiya prosesləri kompleks xarakter daşıyır. 1-10 oktyabr 2019-cu il tarixində Azərbaycan Respublikasında aparılan əhali siyahıyalınmasının nəticəsi göstərmişdir ki, imiqrantların 17,3%-i ailə vəziyyəti, 9,3%-i yaşayış yerini dəyişənlər, 1,9%-i əməkçi miqrantlar, 0,5%-i təhsil alanlar, 0,04%-i xidmət sahəsində çalışanlar, 0,05%-i qohumları ziyarət edənlər, 3,5%-i naməlum səbəblər, 66,5%-ni isə müxtəlif səbəblərdən gələnlər təşkil etmişdir [10, səh.19].

Azərbaycanda əmək miqrasiyası fiziki şəxsin haqqı ödənilərək əmək fəaliyyətilə məşğul olması üçün qanuni əsaslarla bir ölkədən başqa ölkəyə köç etməklə yaşayış yerini dəyişməsidir [miqrasiya məəcəlləsi, maddə 3.09]. Bu prosesdə iştirak edən şəxslər əməkçi miqrantlar adlanır. Əməkçi miqrantlar isə haqqı ödənilən əmək fəaliyyəti ilə məşğul olmaq üçün qanuni əsaslarla bir ölkədən başqa ölkəyə köç edən fiziki şəxslərdir [maddə 3.0.10], [11]. Miqrasiya proseslərinin idarə olunması, həmçinin tənzimlənməsi ilə yanaşı, bu sahələrdə dövlət nəzarətini həyata keçirən səlahiyyətli dövlət qurumları, xarici ölkəyə köç edən, eləcə də, haqqı ödənilən əməkçi miqrantlar qismində olan Azərbaycan Respublikasının vətəndaşları və immiqrantlar, vətəndaşlığı olmayan şəxsləri ölkəyə dəvət edən və onların qeydiyyatına alınması prosesində fəaliyyət göstərən şəxslər miqrasiya proseslərinin iştirakçıları hesab edilir [11].

Müasir şəraitdə əmək miqrasiya axını bir neçə amillərin təsiri altında formalaşmışdır [12, səh. 127], [8, səh.207].

1. İqtisadi amil. Ölkənin iqtisadi inkişaf səviyyəsinin yüksəlməsi, bir sıra dövlətlərlə müqayisədə əməkhaqqı göstəricilərinin artması və əmək bazarında yeni iş yerlərinin yaradılması xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Bu tendensiyalar, aşağı əməkhaqqı səviyyəsinə malik ölkələrdən əməkçi miqrantların axınını stimullaşdırmaqla yanaşı, eyni zamanda iqtisadiyyatın müxtəlif sahələrinə yüksək ixtisaslı mütəxəssislərin cəlb olunması üçün əlverişli şərait yaradır. Azərbaycanın enerji resurslarının əsas təchizatçısı olması, müxtəlif ölkələrdən bu sahə üzrə ölkəyə mütəxəssisləri cəlb edir. Həmçinin, neft sahəsində təhsili fəal şəkildə inkişaf etdirir ki, bu da Asiya və Afrika ölkələrindən təhsil alanların axınına səbəb olur.

2. Demografik amil. Azərbaycan bir çox MDB ölkələri ilə müqayisədə yüksək doğum səviyyəsi və nisbətən gənc yaş strukturu ilə xarakterizə olunur, bu da ölkədə əhalinin artım tendensiyasının formalaşmasına səbəb olur. 2024-cü ilin məlumatına əsasən ölkə əhalisi 10,2 mln nəfərə yaxın olmaqla, əmək qabiliyyətli yaşda olan əhali 6734,4 min nəfər, məşğul əmək qabiliyyətli yaşdan yuxarı əhali 147,5 min nəfər (ümumi 6881,9 mln nəfər), işçi qüvvəsi 5312,1 min nəfər, məşğul əhali 5029,8 min nəfər, işsiz əhali 282,3 min nəfər olmuşdur. İşsizlik səviyyəsi iqtisadi cəhətdən aktiv əhalinin 5,3%-ni təşkil edir ki, bu da 2017-ci illə müqayisədə 0,3% çoxdur. Buna baxmayaraq Azərbaycan əmək bazarında iqtisadiyyatın müəyyən sahələrində xarici mütəxəssislərə müəyyən tələbat var. Bu da, Azərbaycanın digər ölkələrlə, o cümlədən AİB-ə üzv olan dövlətlər arasında miqrasiya axınlarının formalaşmasına təsir edir (cədvəl 2) [12, səh.128], [13, səh.21],

Cədvəl 2

2017-2024-cü illər üzrə Azərbaycan Respublikasının sosial-demoqrafik göstəriciləri
2017-2024-cü illər

№	İllər	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	Əhali sayı, min nəfərlə	9810,0	9898,1	9981,5	9974,0	10026,1	10063,3	10127,1	10180,8
2	Əmək qabiliyyətli yaşda olan əhali,min nəfərlə	6262,2	6326,7	6255,5	6345,9	6447,7	6573,2	6656,2	6734,4
3	İşçi qüvvəsinin sayı,min nəfərlə	5073,8	5133,1	5037,7	5089,9	5141,6	5194,4	5249,7	5312,1
4	Məşğul əhalinin sayı,min nəfərlə	4822,1	4879,3	4785,6	4721,2	4831,1	4901,1	4963,3	5029,8
5	İşsizlik səviyyəsi min nəfərlə və %-lə	251,7 5%	253,8 4,9%	252,1 5%	368,7 7,2%	310,5 6%	293,3 5,6%	266,4 5,5%	282,3 5,3%
6	Azərbaycanda çalışan xarici vətəndaşlar	6602	5048	5466	5287	7698	7926	9438	8141

Cədvəl 2-ə əsasən 2024-cü ildə Azərbaycanda əcnəbi əməkçi miqrant və mütəxəssislər üçün kvota 8141 nəfər olmuşdur ki, bu da 2017-ci illə müqayisədə 1539 nəfər azlıq təşkil edir. Təhlil edilən 8 il ərzində ölkədə ən çox çalışan əcnəbi əməkçi miqrant 2023-cü ildə 9438 nəfər təşkil etmişdir. Bu çalışan miqrantların içərisində Türkiyə (2832 nəfər), Rusiya Federasiyası (869 nəfər) , Hindistan (451 nəfər), Çin (402 nəfər), B.Britaniya və Şimali İrlandiya Krallığından (348 nəfər) olan əməkçi miqrantlar üstünlük təşkil edir .

3. Geosiyasi amil. Bu, sosiomədəni amillərlə birlikdə, əsasən müsəlman ölkələrindən və ya əhalisinin müəyyən bir hissəsini müsəlmanlar təşkil edən ölkələrdən olan əməkçi miqrantların axınına səbəb olur. Hindistan, Pakistan və Rusiya kimi ölkələrdən olan miqrantların sayında artım müşahidə olunur ki, onlar da ölkədə yeni iş yerləri açmağa və bizneslə məşğul olmağa cəhd edirlər.

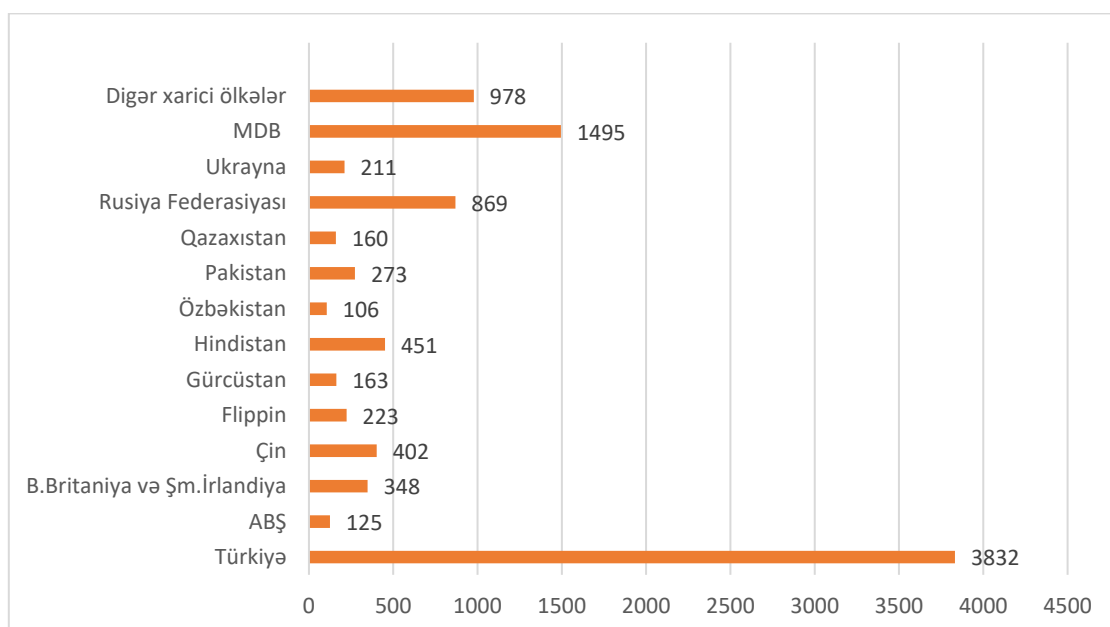
Azərbaycan postsovet məkanında -regional miqyasda miqrasiya proseslərində, həmçinin AİB ölkələri ilə əhali mübadiləsində intensiv iştirak edir .Azərbaycan vətəndaşları üçün ən əhəmiyyətli xarici əmək bazarlarından biri Rusiya Federasiyası hesab olunur. Rusiya Federal Miqrasiya Xidməti tərəfindən 493 mindən çox Azərbaycan vətəndaşı qeydiyyatda alınmışdır ki, bu da ölkə əhalisinin mühüm hissəsinin əmək miqrasiyası məqsədilə həmin istiqamətdə cəmləşdiyini göstərir (2022-ci ilin məlumatlarına görə). Müvəqqəti miqrantlar arasında əməkçi miqrantlar əksəriyyət təşkil edir. Avrasiya İqtisadi Komissiyasının məlumatlarına görə, hər il təxminən 53-55 min Azərbaycan vətəndaşı iş üçün AİB-ə üzv ölkələrə və RF-na, az sayda Qazaxıstan və Belarusiya kimi ölkələrə gedir. RF-nın azərbaycanlılar üçün ən cəlbedici bölgələri Mərkəzi, Cənubi və Volqa Federal dairələridir. Son on ildə azərbaycanlılar Rusiyanın Uzaq Şimalında məskunlaşmağa başlamışlar. 2022-ci ildə təxminən 8823 nəfər soydaşımıza müvəqqəti yaşayış icazəsi və 15610 daimi yaşayış icazəsi verilmiş və 24 000 nəfər Rusiya vətəndaşı olmuşdur. Bu statistik göstəricilər Azərbaycanlıların Rusiya cəmiyyətinə uğurlu integrasiyasını təsdiqləyir [12, səh.128].

Azərbaycanın AİB-ə qoşulması gələcəkdə Azərbaycan vətəndaşlarının ümumi Avropa əmək bazarına çıxışını əhəmiyyətli dərəcədə asanlaşdırır. Bu integrasiya prosesi nəticəsində fəal əmək

ehtiyatlarının sərbəst hərəkətinin daha əlverişli hüquq və institusional çərçivəyə salınması, eyni zamanda ixtisaslara uyğun məşğulluq imkanlarının artması ilə nəticələnə bilər. Ölkədən gedən azərbaycanlılar birlik ölkələrinin vətəndaşları kimi ittifaq daxilində sərbəst hərəkət edib və işləyə bilər, bərabər əmək və sosial hüquqlardan yararlanırlar. Məsələn, əlavə sənədlər və icazələr olmadan əksər peşələrdə işləmək; vergi və pensiya rezidenturası; diplomların və təhsil sertifikatlarının tanınması və s. Həmçinin birlik üzv dövlətlərinə işləməyə gedən soydaşlarımızın digər üzv ölkə vətəndaşları ilə eyni əmək və sosial hüquqlardan yararlanması üçün daha əlverişli imkanlar formalaşa bilər [12, səh.136]. Eyni zamanda əmək miqrasiyası və daimi miqrasiya prosesləri nəticəsində dünyanın müxtəlif bölgələrində mühüm Azərbaycan icmaları yaranmışdır. AİB xaricində Azərbaycan miqrantlarının ən böyük icmaları Türkiyədə (98 min nəfər), Ukraynada (84 min nəfər), ABŞ-da (32 min nəfər), Almaniyada (28 min nəfər), Özbəkistanda (20min nəfər), İsraildə (13 min nəfər) və s. ölkələrdə yaranmışdır. MDB -dən olan 1495 nəfər əməkçi miqrant 2024-cü ildə Azərbaycanda olan əcnəbi miqrantların 18,36%-ni təşkil edir [9, 19].

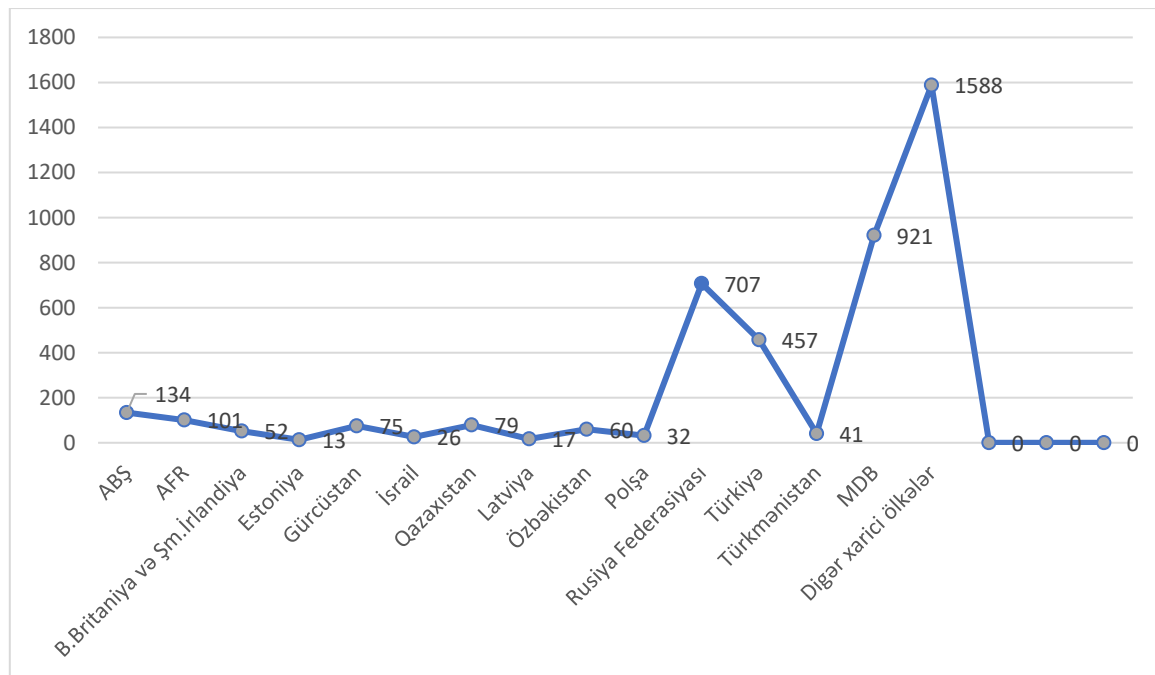
Doğulduqları ölkədən kənarda yaşayan insanların sayı ilə bağlı geniş yayılmış məlumatlar müasir global miqrasiya axınlarının intensivliyini kifayət qədər əks etdirmir. Dünya ölkələrində miqrasiya axınlarının intensivliyi dünya əhalisini təxminən 6%-i səviyyəsində sabit qalmışdır. Dünyada ən böyük miqrasiya hərəkətlərini Cənubi və Qərbi Asiya arasında, Latin Amerikasından Şimali Amerikaya yönəldiyi halda azərbaycanlılar üç fərqli əraziyə daha çox miqrasiya etmişdirlər. Rusiya Federasiyası, Qərb ölkələri (AFR, Hollandiya, Fransa), ABŞ və Yaxın Şərq (əsasən Türkiyə). Bu isə o deməkdir ki, həmin ölkələrə miqrasiya meylinin səviyyəsi digər ərazilərlə müqayisədə daha yüksək olmuş, azərbaycanlıların demoqrafik təmsilçiliyi və sosial-məişət fəaliyyəti bu üç regionda daha nəzərə cərpacaq dərəcədə yüksəkdir [14, səh.1520], [15].

Azərbaycan həm də miqrant qəbul edən tərəf olmaqla bir sıra MDB və AİB ölkələrindən, eləcə də, ABŞ, Banqladeş, Flippin, Pakistan və s. kimi ölkələrdən əməkçi miqrantlar qəbul edir, bu da ölkədə əcnəbi işçi qüvvəsinin tərkibinin çoxşaxəli olduğunu göstərir (şəkil 2).



Şəkil 2. 2024-cü ildə Azərbaycanda əcnəbi əməkçi miqrantların sayı

Azərbaycanda əməkçi miqrantların çox hissəsi Türkiyə (3832 nəfər), Rusiya Federasiyası (899 nəfər), Hindistan (451 nəfər), Çin (402 nəfər), Böyük Britaniya və Şimali İrlandiya (348 nəfər), Pakistan (273 nəfər) kimi ölkələrin payına düşür (şəkil 2) [16].



Şəkil 3. Ölkələr üzrə Azərbaycandan gedən əməkçi miqrantların sayı
Asis.az saytının məlumatları əsasında müəllif tərəfindən tərtib edilmişdir [19]

Şəkil 3-dən də göründüyü kimi Azərbaycandan gedən əsas əməkçi miqrantlar Rusiya Federasiyası və MDB-yə, daha sonra Türkiyə, ABŞ, AFR, Qazaxıstan kimi ölkələrə üz tutmuşlar.

Respublika üçün əmək miqrasiyasının mühüm iqtisadi aspektlərindən biri miqrant işçilər və diaspora nümayəndələri tərəfindən mənşə ölkələrinə remittansların həyata keçirilməsidir. Bu köçürmələr bir tərəfdən miqrantların ailə rifah halının yüksəlməsinə və yoxsulluğun aradan qaldırılmasına xidmət etsə də, digər tərəfdən miqrantları qəbul edən ölkənin əmək bazarında formalaşan gəlir axınlarının xaricə yönəlməsi ilə xarakterizə olunur. Nəticə etibarilə, pul köçürmələri həm beynəlxalq maliyyə münasibətlərinin mühüm komponentinə çevrilməklə yanaşı, donar və qəbul edən ölkələr arasında iqtisadi asılılığın çoxalmasına qarşılıqlı əməkdaşlığın möhkəmlənməsinə kömək edir [12, səh.138], [15].

Azərbaycanın miqrasiya qanunvericiliyi həmçinin, müəyyən kateqoriyalı əcnəbilərə (daimi yaşayış icazəsi olan) xüsusi iş icazəsi olmadan işləməyə icazə verir. Hazırda Azərbaycanda və dünyada qeyri-legal miqrasiya ilə hüquqi problemlər aktual olan sosial və hüquqi problemdir və onun genişlənməsi bir neçə əsas səbəblə bağlıdır. İnsanlar yüksək səviyyəli həyat şəraiti, maddi rifahın yüksəlməsi və təhlükəsizlik axtarışı ilə qeyri-qanuni yollarla başqa ölkələrə miqrasiya edirlər. Eyni zamanda müharibələr və siyasi sabitsizlik də bu prosesin artmasına səbəb olur. Viza rejimlərinin sərtləşdirilməsi və legal miqrasiya yollarının məhdudlaşdırılması da insanların qeyri-leqal yolları seçməsinə təsir edir. Bu problemlərin aradan qaldırılması və həlli ona qarşı mübarizə sahəsində müxtəlif ölkələrdə qanunvericiliyin təkmilləşdirilməsi sahəsində tədbirlər görülür. İllegal miqrasiya ilə mübarizə sahəsində dövlətlərin təcrübəsi və dövlətlərarası əməkdaşlıq məsələləri olduqca vacibdir. [17, səh.106, 119], [18, səh.131].

Nəticə və təkliflər. Aparılan tədqiqat göstərir ki, Azərbaycanda miqrasiyanın tarixi kökləri vardır və ölkələr üzrə miqrasiya proseslərində baş verən dəyişikliklər XX əsrin sonlarında daha da intensivləşmişdir. 1990-cı ilin əvvəllərində ölkədə 1138 min nəfər məcburi köçkün ordusu yaranmış, bunların da 350 min nəfəri Ermənistandan, qalan hissəsi isə Qarabağ ərazisindən olan məcburi köçkünlər idi. 1990-cı ildən 2024-cü ilə qədər ölkəyə gələnlərin və gedənlərin sayı azalmışdır (gələnlərin sayı 135,9 min nəfər, gedənlərin sayı isə 79,9 min nəfər). 1991-ci ildən 2022-ci ilə qədər Azərbaycana gələnlərin sayı 44,4 min nəfərdən 1,7 min nəfərə düşərək 26 dəfə, ölkədən gedənlərin sayı 2017-ci ildən 63,4 min nəfərdən 2024-cü ildə 724 nəfərə qədər azalaraq 88 dəfə azalmışdır və 2008-ci ildən miqrasiya saldosu müsbət qiymət almışdır. 2024-cü ildə Azərbaycanda əməkçi miqrant və mütəxəssislər üçün kvota 8141 nəfər olmuşdur, son səkkiz ildə ən çox kvota 2023-cü ildə 9438 nəfərlə maksimum həddə çatmışdır. Bu çalışan miqrantlar içərisində 2832 nəfərlə Türkiyə və 869 nəfərlə Rusiya Federasiyası qabaqcıl yer tutur. Bununla yanaşı, ölkə beynəlxalq miqrasiya proseslərinə, o cümlədən əmək miqrasiyasına kifayət qədər fəal şəkildə integrasiya olmuşdur. Azərbaycan miqrasiya qanunvericiliyinə əsasən, müəyyən kateqoriyalı xarici vətəndaşlara iş icazəsi olmadan işləməyə icazə verir. Ölkənin Azərbaycan mənşəli miqrantlarından daxil olan pul köçürmələrindən müəyyən dərəcədə asılılığı nəzərə alınaraq, dövlət tərəfindən ölkə xaricində yaşayan diaspor icmalarına xüsusi diqqət yetirilir, onların hüquqlarının qorunması və sosial həyat səviyyəsinin təmin edilməsi istiqamətlərində məqsədyönlü siyasət həyata keçirilir.

Miqrasiyanın, əsasəndə emiqrantların sayını azaltmaq üçün kompleks sosial-iqtisadi tədbirlərin həyata keçirilməsi vacibdir. Müvafiq olaraq adı gedən kontekstdə aşağıdakı addımlar mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

-Yeni iş yerlərinin yaradılması, xüsusilə gənclər arasında məşğulluq səviyyəsinin artırılması, müxtəlif iqtisadi fəaliyyət sahələrinin və əmək bazarının genişləndirilməsi

-Regionların sosial-iqtisadi inkişafı, Respublikada paytaxt və regionlar arasında sosial-iqtisadi inkişafın qeyri-bərabərliyinin azaldılması, regionlararası inkişaf balansının təmin olunması və əhalinin həyat səviyyəsinin yüksəldilməsi üçün əlverişli sosial-iqtisadi şəraitin formalaşdırılması

-Beyin axınının qarşısının alınması, yüksək ixtisaslı kadrlar və mütəxəssislər üçün elmi-tədqiqat imkanlarının, əlverişli mühitin və innovativ tədqiqat maraqlarının yaradılması

ƏDƏBİYYAT

1. Г.Г. Панахов. Политика регулирования международной миграции, АМЕА-nın xəbərləri.İqtisadiyyat seriyası. 2020 (yanvar-fevral) səh.46-51.
2. Aygül Abbaszadə, Azər Allahverənov. Miqrasiya üzrə dərslik, 2024, səh.408.
3. A.A. Ağayarova, Azərbaycan Respublikasında əhali miqrasiyasının tənzimlənməsi xüsusiyyətləri, АМЕА-nın xəbərləri, İqtisadiyyat seriyası, 2020 (yanvar-fevral) səh.52-55.
4. Агаярова, А.А. Основные особенности современных миграционных процессов. Экономика и предпринимательство.2021, №6. стр.152-157.
5. V.Əfəndiyev və b.. Azərbaycanın sosial və iqtisadi coğrafiyası. Dərslik. Bakı-2010, səh.460.
6. Ариф Юнусов, Фактор интеграции в миграционных процессах в Азербайджане, Elmi-tədqiqat hesabatı, 2013/8, səh.17.
7. Апанович, М.Ю. Вопросы интеграции мигрантов в Европе .- Журнал «Вестник МГИМО» (Москва), 2011, №6, стр.248-255.

8. V.Əfəndiyev, S.Nağıyev. Əhali coğrafiyası dərslik, Bakı-2010, səh.335.
9. https://www.azstat.gov.az/portal/tblInfo/TblInfoList.do?vw_cd=MT_ATITLE#
10. A.A .Ağayarova Avtoreferat, Azərbaycanca miqrasiya proseslərinin dövlət tənzimlənməsinin təkmilləşdirilməsi istiqamətləri. Bakı 2024, səh.32.
11. Azərbaycan Respublikasının miqrasiya məəcəlləsi, 2013.
12. С.В. Рязанцев, Т.Т. Гусейнов. Международная трудовая миграция в Азербайджане в контексте взаимодействия со странами ЕАЭС, Вестник Российского университета дружбы народов, серия: Экономика 2025. том 33, № 1, стр.123-143.
13. F.Aslanova. Azərbaycanca miqrasiya proseslərinin iqtisadi-demoqrafik aspektləri.Avtoreferat. Bakı 2017. səh.33.
14. Abel Sander (2014). Quantifying Global International Migration Flows/Science 343 (6178).
15. S.H.İmanova . Əhali coğrafiyası. Dərslik, Bakı-2026.
16. <https://www.azstat.gov.az/portal/tblInfo/TblInfoList.do#>
17. N.Zeynalova-Sultanova. Qanunsuz miqrasiyaya qarşı mübarizədə Beynəlxalq əməkdaşlıq. Azərbaycan Hüquq jurnalı.2024 (№3) səh.106-119.
18. Aleshkovsky I. A. Illegal migration as a phenomenon of the global world, Century of globalization 2014 • No. 2, p. 130. 129–136.
19. https://www.azstat.gov.az/portal/tblInfo/TblInfoList.do#994_001

REFERENCES

1. G.G. Panakhov. Politika regulirovaniya mejdunarodnoy migratsii, AMEA-nin kheberleri, Igtisadiyyat seriyasi, 2020 (yanvar-fevral), seh. 46-51.
2. Aygul Abbaszade, Azer Allahverenov. *Migrasiya uzre derslik*, 2024, seh. 408.
3. A.A. Agayarova, Azerbaijan Respublikasinda ehali migrasiyasinin tenzimlenmesi khususiyetleri, AMEA-nin kheberleri, Igtisadiyyat seriyasi, 2020 (yanvar-fevral), seh. 52-55.
4. Agayarova, A.A. “Osnovnie osobennosti sovremennikh migratsionnykh protsessov.” *Ekonomika i predprinimatelstvo*, 2021, №6, str. 152–157
5. V. Efendiyev ve b. Azerbaijanin sosial ve igtisadi joghrafiyasi. Derslik, Baki-2010, seh. 460.
6. Arif Yunusov, Faktor integratsii v migratsionnikh protsessakh v Azerbaydjanda, Elmi-tedgigat hesabati, 2013/8, seh. 17.
7. Apanovich, M.Yu. Voprosi integratsii migrantov v Evrope. Jurnal “*Vestnik MGIMO*” (Moskva), 2011, №6, str. 248–255.
8. V.Efendiyev, S.Naghiyev. Ehali joghrafiyasi. Derslik, Baki-2010, seh. 335.
9. https://www.azstat.gov.az/portal/tblInfo/TblInfoList.do?vw_cd=MT_ATITLE#
10. A.A. Aghayarova. Avtoreferat, Azerbayjanda migrasiya proseslerinin dovlet tenzimlenmesinin tekmlleshdirlmesi istigametleri. Baki, 2024, seh. 32.
11. Azerbaijan Respublikasinin Migrasiya Mejellesi, 2013.

12. S.V. Ryazantsev, T.T. Guseynov. Mejdunarodnaya trudovaya migratsiya v Azerbaydjane v kontekste vzaimodeystviya so stranami EAES, Vestnik Rossiyskogo universiteta družbi narodov, seriya: Ekonomika, 2025, tom 33, №1, str. 123–143.
13. F. Aslanova. Azerbajjanda migrasiya proseslerinin iqtisadi-demoqrafik aspektleri. Avtoreferat. Baku, 2017. 33 p.
14. Abel Sander (2014). Quantifying Global International Migration Flows/Science 343 (6178).
15. S.H. Imanova. Ehali coqrafiyasi. Derslik, Baki-2026.
16. <https://www.azstat.gov.az/portal/tblInfo/TblInfoList.do#>
17. N. Zeynalova-Sultanova. Ganunsuz migrasiyaya garshi mubarizede Beynelkhalg emekdashlig. *Azerbaijan Hugug Jurnali*, 2024, (№ 3), seh. 106–119.
18. Aleshkovsky I. A. Illegal migration as a phenomenon of the global world, Century of globalization 2014 • No. 2, p. 130. 129–136.
19. https://www.azstat.gov.az/portal/tblInfo/TblInfoList.do#994_001

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL FEATURES OF MIGRATION PROCESSES IN THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN

Imanova S.H.

Azerbaijan State Pedagogical University

The research study conducts an in-depth analyzes of the structural, substantive, and functional characteristics of migration processes in the Republic of Azerbaijan, as well as their principal directions. It is noteworthy that population migration is one of crucial factors having an impact on the socio-economic development of countries. Within the context of globalization and the integration of global labor markets, the intensity of migration prosses has increased substantially. During this process, economic motives such as the employment generation and the enhancement population welfare are frequently observed. Concurrently, the study supplies a comprehensive analysis of the influence of political factors - particularly armed conflicts, persecution, and instability-on the formation and dynamics of internal migration processes.

Furthermore, the research paper discusses the historical development of migration in Azerbaijan, the expansion of population movements in the 19th–20th centuries, and the intensification of political migration in 1988–1990. Consequently, more than 1.1 million internally displaced persons from Armenia and the Karabakh region encountered a range of socio-political issues. In addition, the study the research systematically examines the factors shaping migration processes in the Republic of Azerbaijan, their interaction mechanisms, and their main directions. The conducted analyses indicate that, in the current context, labor migration flows in the country have been shaped by several factors: economic, demographic, and geopolitical.

Labor migrants leaving the country are accounted for by CIS countries (especially the Russian Federation) and member states of the Eurasian Economic Union. In the inflow of migrants to the country, migrants arriving from Turkey, Russia and EEU member states predominant. Azerbaijan is extensively engaged in regional migration, migration process, and population transfer with the post-Soviet region and with the ABD countries.

Consequently, it becomes evident that, migrants from Azerbaijan predominantly move in three directions: the Russian Federation, Western countries, as well as the United States and the Middle East region.

Keywords: migration, emigration, immigration, migrant worker, labor market, labor force, remittance, ethnopolitical

Müəllif haqqında məlumat

Soyadı, adı, atasının adı	İş yeri	Vəzifəsi, elmi dərəcəsi, elmi adı	Əlaqə
İmanova Sona Hüseynağa qızı	Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti	“Azərbaycan coğrafiyası və coğrafiyanın tədrisi texnologiyası” kafedrasının müdiri, c.ü.f.d., dos.	Sona.imanova@adpu.edu.az sona.imanova125@mail.ru mob: (+994) 50 590-90-65

MÜNDƏRİCAT

AVİASIYA VƏ RAKET-KOSMİK TEXNİKASI

1. Aviasiya mühərriki ventilyator pərinin Bézier əsaslı orta əyrilik xətti vasitəsilə parametrik həndəsi idarə edilməsi. Səmədov Ə.S., Ramzanova F.N. 1
2. Hərəkət sistemlərinə tətbiqlər üçün təkmilləşdirilmiş kimyəvi tarazlıq əsaslı yanma modelləşdirilməsi: ədədi sabitləşdirmə, faza sərhədinin nəzərə alınması və soplo layihələndirilməsi nəticələri. Abdulla N.P. 10

CİHAZQAYIRMA

3. Bitki xəstəliklərinin aşkarlanması və torpaq nəmliyi təhlili üçün süni intellekt əsaslı kənd təsərrüfatı robotu. Qasimov V.Ə., Dadaşov F.H., Həsənov H.B., Hüseynov N.E. 24

MATERIALŞÜNASLIQ

4. Neft distillatlarının ion maye ilə təmizlənməsi. Nəsirov F.Ə. 39
5. Sintez edilmiş yeni arilsulfonilpiperidin törəmələrinin *in vitro* bioloji skriningi və *MurA* fermentinə qarşı inhibitor potensialının *in silico* tədqiqi. Məmmədova S.İ., Zeynalova L.F., Məmmədova G.H., Əskərova K.T., Ağazadə A.Ə., Ladoxina N.P. 52

İNFORMASIYA TEXNOLOGİYALARI

6. Dəmiryol stansiyalarının istismar etibarlılığını qiymətləndirmək üçün mövcud metod və modellərin təhlili. Manafov E.K. 66
7. Qeyri-səlis implikasiyaların Z-implikasiyaya genişləndirilməsi. Əhmədov Ş.A. 79

TƏDRİSİN METODOLOGİYASI

8. Virtual tədris texnologiyalarının təhsil keyfiyyətinə təsirinin qiymətləndirilməsi üçün integrasiyalı Bayes və qraf əsaslı yanaşma. Əhmədov L.N., Osmanlı T.E. 90

İQTİSADIYYAT

9. Azərbaycan Respublikasında əhəlinin gəlirlərinin diferensiasiyasının statistik təhlili. Muradova X.F. 107

10. Azərbaycan Respublikasında demoqrafik göstəricilərin qarşılıqlı əlaqəsinin ekonometrik təhlili. Abdullayeva S.İ. 123



11. Azərbaycan Respublikasında miqrasiya proseslərinin struktur və funksional xüsusiyyətləri. İmanova S.H. 140

CONTENTS

AVIATION AND ROCKET SPACE TECHNOLOGY

1. Parametric geometry control of an aero-engine fan blade using a Bezier-based mean camber line. Samadov A.S., Ramazanova F.N. 1
2. Refined chemical-equilibrium combustion modeling for propulsion applications: numerical stabilization, phase-boundary treatment, and nozzle-design consequences. Abdulla N.P. 10

INSTRUMENTATION

3. A real-time ai-driven agricultural rover integrating plant disease detection and geo-referenced soil moisture analysis. Qasimov V.Ə., Dadaşov F.H., Həsənov H.B., Hüseynov N.E. 24

MATERIALS SCIENCE

4. Ionic liquid purification of petroleum distillates. Nasirov F.A. 39
5. *In vitro* Biological screening of newly synthesized arylsulfonylpiperidine derivatives and *in silico* research of their inhibitory potential against *MurA* enzyme. Mammadova S.I., Zeynalova L.F., Mammadova G.H., Askarova K.T., Agazade A.A., Ladokhina N.P. 52

INFORMATION TECHNOLOGY

6. Analysis of existing methods and models for assessing the operational reliability of railway stations. Manafov E.K. 66
7. Extension of fuzzy implications to Z-implication. Ahmadov Sh.A. 79

TEACHING METHODOLOGY

8. An integrated Bayesian and graph-based approach for assessing the impact of virtual learning technologies on educational quality. Ahmadov L.N., Osmanli T.E. 90

ECONOMICS

9. Statistical analysis of income differentiation in the Republic of Azerbaijan. Muradova Kh.F. 107
10. Econometric analysis of the interrelationship of demographic indicators in the Republic of Azerbaijan. Abdullayeva S.I. 123

SOCIAL SCIENCES

11. Structural and functional features of migration processes in the Republic of Azerbaijan.
Imanova S.H.

140

Məqalələrin təqdim olunma qaydaları

Məqalələr elektron variantda MS WORD formatında <https://scientific-journals.naa.edu.az/index.html> ünvanında və OJS platformasında <https://submission-scientific-journals.naa.edu.az/index.php> yerləşdirilir və Azərbaycan, rus və ingilis dillərində qəbul olunurlar. Hər bir məqaləyə Azərbaycan və ingilis dillərində, rus dilində olan məqalələrə isə hər üç dildə annotasiya və açar sözlər verilməlidir. Çapa təqdim olunan məqalələr A4 formatda, 12 ölçülü şriftlə (cədvəllər, şəkillər və şəkilsiz yazılar 11 ölçülü şriftlə), 1,15 intervalla işlənməlidir. Boşluqlar: vərəqin bütün kənarlarından 2 sm-dir. Məqalənin həcmi 15 səhifədən artıq olmamalıdır.

Məqalələrə müsbət rəy verildikdən sonra redaksiya heyətinin qərarı ilə çap olunur.

Doktorantlar məqaləni elmi rəhbərinin rəyi ilə birgə saytda yerləşdirməlidir.

1. Hər bir məqalə məqalənin yazıldığı dildə onun UOT-u və ya PACS-ı, DOI-si, adı, müəlliflərin adı, ata adı, soyadları, elektron ünvanları, təşkilatın adı 1,15 intervalla çap olunmalı, annotasiya və açar sözlərlə başlanmalıdır.

2. Ədəbiyyata istinad (References):

-ədəbiyyata istinad məqalədə rast gəlinəndə ardıcılıqla işlənməlidir.

Sitat gətirmə qaydası:

-dövri jurnallardakı məqalələr: müəlliflərin A.A. Soyadları, məqalənin adı, dövri jurnalın adı, çap olunma ili, cildi, nömrəsi, səhifə nömrəsi;

-konfrans materialları və tezislər: müəlliflərin A.A. Soyadları, konfrans materialları və ya tezisnin adı, konfransın adı, keçirildiyi yer və il, çap materialının cildi, nömrəsi və səhifələri;

-kitablar: müəlliflərin soyadları, kitabın adı, çap olunduğu nəşriyyat, il və yer, səhifələrin sayı, təkrar istinadlarda isə səhifə nömrəsi verilir.

References - ədəbiyyatın orijinal dildə ingilis əlifbası ilə verilmiş variantıdır.

3. Annotasiya.

Annotasiya 200 sözdən az olmamalıdır.

Açar sözlər 8-10 sözdən ibarət olmalıdır.

4. Rəsmlər və şəkillər.

Rəsmlər və şəkillər yazıları və izahatları ilə təqdim olunmalıdır. Ölçülər: 6 sm x 6 sm-dan az və 23sm x 16 sm-dan çox olmayaraq. Qrafiklərin koordinat oxları rəqəm tərkibli olmalıdır. Koordinat oxlarının adları çox aydın yazılmalıdır. Qrafiklərdəki hər bir xətt nömrələnmiş və izahlı şəkildə olan yazılarla verilməlidir.

5. Cədvəllər nömrələnmeli və başlıqla verilməlidir.

6. Məqalənin sonunda müəlliflər haqqında məlumat verilir: adı, soyadı və atasının adı, elmi dərəcəsi, elektron ünvanı, iş yeri və vəzifəsi, işin icra olunduğu şöbə, laboratoriya və ya kafedra.

Verilmiş tələblərə uyğun gəlməyən məqalələrə baxılmır!!!

Rules for submitting articles

Articles are placed in electronic form in MS WORD format at <https://scientific-journals.naa.edu.az/index.html> and on the OJS platform <https://submission-scientific-journals.naa.edu.az/index.php> and are accepted in Azerbaijani, Russian and English. Each article must be provided with annotations and keywords in Azerbaijani and English, and articles in Russian in all three languages. Articles submitted for publication must be in A4 format, 12-point font (tables, figures and captions in 11-point font), with 1.15 spacing. Margins: 2 cm from all edges of the sheet. The length of the article should not exceed 15 pages.

After a positive review of the articles, they are published by the decision of the editorial board.

Doctoral students must place the article on the website together with the opinion of their scientific supervisor.

1. Each article should be printed in the language of the article, with its UOT or PACS, DOI, title, authors' names, patronymics, surnames, e-mail addresses, name of the organization at 1.15 intervals, and should begin with annotation and keywords.

2. References:

-References to literature should be used in the order in which they appear in the article.

Citation rules:

-articles in periodicals: authors' A.A. Surnames, title of the article, title of the periodical, year of publication, volume, issue, page number;

-conference materials and abstracts: authors' A.A. Surnames, title of the conference materials or abstract, name of the conference, place and year of publication, volume, issue and pages of the printed material;

-books: authors' surnames, title of the book, publisher, year and place of publication, number of pages, and in repeated references, page number is given.

References - a version of the literature in the original language in English alphabet.

3. Annotation.

The annotation should consist of a minimum of 200-220 words.

Keywords should consist of 8-10 words.

4. Drawings and pictures.

Drawings and pictures should be presented with captions and explanations. Dimensions: not less than 6 cm x 6 cm and not more than 23 cm x 16 cm. The coordinate axes of the graphs should contain numbers. The names of the coordinate axes should be written very clearly. Each line in the graphs should be numbered and given with explanatory inscriptions.

5. Tables should be numbered and given with a title.

6. At the end of the article, information about the authors is provided: name, surname and patronymic, academic degree, email address, place of work and position, department, laboratory or chair where the work was performed.

Articles that do not meet the given requirements will not be considered!!!

Texniki redaktor

Vəliyeva Q.C.

Korrektorlar

k.f.d. Yüzbaşova L.N., Osmanlı J.R., Zeynalova A.E., Məmmədova Z.A.

Dizayner

Binnətəliyeva T.V.

“Elmi Məcmuə”nin redaksiya heyəti tərəfindən
nəşrə hazırlanmış və çapına icazə verilmişdir.

Technical editor

Valiyeva G.J.

Correctors

Phd (Chem.) Yuzbashova L.N., Osmanlı J.R., Zeynalova A.E., Mammadova Z.A.

Designer

Binnataliyeva T.V.

"Scientific Journal" prepared for publication by the
editorial board and permission to print.

Çapa hazırlanmışdır: 15.07.2026
“Elmi Məcmuə”
“RAF poliqraf 2017” nəşriyyatında çap olunmuşdur.
Formatı - 60x84 1/8.
Tiraj 50 nüsxə.

Editor-in-chief

DSc (Phys. & Math.), Academician Arif M. Pashayev

Scientific Editor

DSc (Tech.), prof. Rasim N. Nabiyev

Members of the editorial board (by scientific fields)**Technical sciences**

DSc (Tech.), Prof. Afiq R. Hasanov (**editor**)

DSc (Tech.), Prof. Adalat S. Samadov

DSc (Phys. & Math.), Prof. Messoud A. Efendiev, Helmholtz Zentrum München, Germany

DSc (Phys. & Math.), Prof. Ali T. Ismail-Zadeh, Karlsruhe Institute of Technology, Germany

DSc (Tech.), Prof. Alexander A. Igolkin, Samara University, Russia

Ph.D (Tech.), Ass. Prof. Oleg B. Spiridonov, Southern Federal University, Russia

DSc (Tech.), Prof. Ismail M. Ismailov

DSc (Tech.), Prof. Ahad Kh. Janahmadov

DSc (Tech.), Prof. Parviz Sh. Abdullayev

DSc (Phys. & Math.), Prof. Karim R. Allahverdiyev

DSc (Tech.), Prof. Khagani I. Abdullayev

DSc (Phys. & Math.), Prof. Kamal A. Asgarov

DSc (Tech.), Prof. Nazim Sh. Huseynov

DSc (Tech.), Prof. Aytaj N. Badalova

Ph.D (Phys. & Math.), Prof. Islam A. Isgandarov

Ph.D (Tech.), Ass. Prof. Elman M. Najafov

Ph.D (Tech.), Ass. Prof. Fuad H. Dadashov

Legal sciences

DSc (Law), Prof. Aykhan Kh. Rustamzadeh (**editor**)

Prof. Dr. (Law), Javid S. Abdullazadeh, Ankara University, Türkiye

Prof. Dr. (Law), Yener Unver, Özyeğin University, Türkiye

Prof. Dr. (Law), Omer Chinar, İbn Haldun University, Türkiye

DSc (Law), Prof. Nazim H. Jafarli

DSc (Law), Prof. Subhan F. Aliyev

DSc (Law) Fardin Y. Khalilov

DSc (Law), Ass. Prof. Rauf M. Garayev

Economic sciences

Ph.D (Econ.), Ass. Prof. Gulnara T. Ahmedova (**editor**)

D.Sc (Econ.), Prof. Heydar S. Hasanov

D.Sc (Econ.), Prof. Rustem T. Yuldashev, Moscow State Institute of International Relations, Russia

D.Sc (Econ.), Prof. Salim Y. Muslumov

D.Sc (Econ.), Prof. Sarvar A. Abbasov

D.Sc (Econ.), Prof. Elnur M. Sadigov

Ph.D (Econ.), Ass. Prof. Farida F. Alakbarova

Ph.D (Econ.), Ass. Prof. Vafa G. Najafova

Ph.D (Econ.), Ass. Prof. Fuad M. Mirzayev

Categories of the "Scientific Journal": aviation and rocket space technology, air navigation, aviation security, aviation meteorology, aerospace monitoring and environmental protection, instrumentation, radio electronics, telecommunications, information processing, transport logistics, physics, solid-state electronics, materials science, information technology, system analysis, control systems, teaching methodology, law, economics, management, social sciences.

"Scientific Journal" was registered at the Ministry of Press and Information of the Republic of Azerbaijan in 1999 (Reg. № 492).

The journal is included into the recommended list of periodical scientific publications of Higher Attestation Commission under the President of the Republic of Azerbaijan.

Address: AZ1045, Baku, Mardakan Ave. 30, National Aviation Academy

Tel. (+994) 12 497 28 24. E-mail: em@naa.edu.az Website: <https://scientific-journals.naa.edu.az/>

