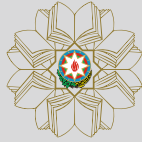


ISSN 1815-1779



Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi
Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan
Министерство Науки и Образования Азербайджанской Республики



Azərbaycan Texniki Universiteti
Azerbaijan Technical University
Азербайджанский Технический Университет

ELMİ ƏSƏRLƏR

PROCEEDINGS

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ





ISSN 1815-1779

ELMI ƏSƏRLƏR
Elmi-texniki jurnal

PROCEEDINGS
Scientific-technical journal

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
Научно-технический журнал

№2
2025

Bakı – 2025

Təsisçi: Azərbaycan Texniki Universiteti
Founder: Azerbaijan Technical University
Учредитель: Азербайджанский Технический Университет

Jurnal 1992-ci ildən nəşr olunur. Şahadətnamə №305.
The journal is published since 1992. Certificate No. 305.
Журнал издается с 1992 года. Сертификат №305.

REDAKSIYA HEYƏTİ

Baş redaktor:

prof. V.M.Vəliyev

Baş redaktorun müavirləri:

prof. S.N.Namazov

prof. N.A.Yusifbəyli

Məsul katib:

t.f.d. X.M.Nəbiyev

Redaksiya heyətinin üzvləri:

akademik A.M.Paşayev

(Azərbaycan)

akademik T.A.Əliyev (Azərbaycan)

AMEA-nın müxbir üzvü

A.Z.Məlikov (Azərbaycan)

prof. V.Mixaylov (Almaniya)

prof. S.Təkəli (Türkiyə)

prof. S.Simon (Almaniya)

prof. V.İ.Baxşəli (Azərbaycan)

prof. İ.A.Babayev (Azərbaycan)

prof. M.Güdəni (Türkiyə)

prof. Z.D.Kovalyuk (Ukrayna)

prof. H.N.Nəcəfov (Türkiyə)

prof. Fahd Jarad (Türkiyə)

prof. E.Ə.Məsimov (Azərbaycan)

prof. P.D.Lazzaro (İtaliya)

prof. Z.A.Cahangirli (Azərbaycan)

prof. V.Ə.Qasimov (Azərbaycan)

prof. F.V.Yusubov (Azərbaycan)

prof. V.İ.Nəsirov (Azərbaycan)

prof. A.N.Məmmədov (Azərbaycan)

prof. R.M.Rzayev (Azərbaycan)

prof. Y.Ə.Şərifov (Azərbaycan)

prof. İ.İ.Əliyev (Azərbaycan)

prof. H.D.Orucov (Azərbaycan)

prof. Ə.Q.Əlirzayev (Azərbaycan)

prof. F.Ə.Qənbərov (Azərbaycan)

dos. A.A.Namazov (Azərbaycan)

dos. S.Z.Əhmədov (Azərbaycan)

dos. R.A.Əmirova (Azərbaycan)

dos. A.N.Eminov (Azərbaycan)

dos. H.B.Quliyev (Azərbaycan)

i.e.f.d. N.V.Namazova (Azərbaycan)

EDITORIAL BOARD

Chief editor:

prof. V.M.Valiyev

Deputy chief editors:

prof. S.N.Namazov

prof. N.A.Yusifbayli

Senior secretary:

PhD Kh.M.Nabiyev

Member of the editorial board:

academician A.M.Pashayev

(Azerbaijan)

academician T.A.Aliyev

cor.member of ANAS A.Z.Melikov

(Azerbaijan)

prof. V.Mikhailov (Germany)

prof. S.Tekeli (Turkey)

prof. S.Simon (Germany)

prof. V.I.Bakhshali (Azerbaijan)

prof. I.A.Babayev (Azerbaijan)

prof. M.Guden (Turkey)

prof. Z.D.Kovalyuk (Ukraine)

prof. H.N.Najafov (Turkey)

prof. Fahd Jarad (Turkey)

prof. E.A.Masimov (Azerbaijan)

prof. P.D.Lazzaro (Italy)

prof. Z.A.Jahangirli (Azerbaijan)

prof. V.A.Gasimov (Azerbaijan)

prof. F.V.Yusubov (Azerbaijan)

prof. V.I.Nasirov (Azerbaijan)

prof. A.N.Mammadov (Azerbaijan)

prof. R.M.Rzayev (Azerbaijan)

prof. Y.A.Sharifov (Azerbaijan)

prof. I.I.Aliyev (Azerbaijan)

prof. H.D.Orudzhev (Azerbaijan)

prof. A.G.Aliorzayev (Azerbaijan)

prof. F.A.Ganbarov (Azerbaijan)

ass.prof. A.A.Namazov (Azerbaijan)

ass.prof. S.Z.Ahmadov (Azerbaijan)

ass.prof. R.A.Amirova (Azerbaijan)

ass.prof. A.N.Eminov (Azerbaijan)

ass.prof. H.B.Guliyev (Azerbaijan)

PhD N.V.Namazova (Azerbaijan)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

проф. В.М.Валиев

Зам. гл. редактора:

проф. С.Н.Намазов

проф. Н.А.Юсифбейли

Ответственный секретарь

д.ф.т. Х.М.Набиев

Члены редакционной коллегии:

академик А.М.Пашаев

(Азербайджан)

академик Т.А.Алиев

(Азербайджан)

член-корреспондент НАНА

А.З.Меликов (Азербайджан)

проф. В. Михайлов (Германия)

проф. С.Текели (Турция)

проф. С.Симон (Германия)

проф. В.И.Бахшали (Азербайджан)

проф. И.А.Бабаев (Азербайджан)

проф. М.Гюдени (Турция).

проф. З.Д.Ковалюк (Украина)

проф. Х.Н.Наджафов (Турция)

проф. Фахд Жарад (Турция)

проф. Е.А.Масимов (Азербайджан)

проф. П.Д.Лаззаро (Италия)

проф. З.А.Джахангирли (Азербайджан)

проф. В.А.Гасимов (Азербайджан)

проф. Ф.В.Юсубов (Азербайджан)

проф. В.И.Насиров (Азербайджан)

проф. А.Н.Мамедов (Азербайджан)

проф. Р.М.Рзаев (Азербайджан)

проф. Я.А.Шарифов (Азербайджан)

проф. И.И.Алиев (Азербайджан)

проф. Г.Д.Оруджев (Азербайджан)

проф. А.Г.Алирзаев (Азербайджан)

проф. Ф.А.Ганбаров (Азербайджан)

доц. А.А.Намазов (Азербайджан)

доц. С.З.Ахмедов (Азербайджан)

доц. Р.А.Амирова (Азербайджан)

доц. А.Н.Эминов (Азербайджан)

доц. Х.Б.Гулиев (Азербайджан)

д.ф.э. Н.В.Намазова (Азербайджан)

İcraçı redaktor: İ.İ.Ağazadə

Executive Editor: I.I.Aghazada

Исполнительный редактор: И.И.Агазаде

Redaksiyanın ünvanı: AZ1073, Bakı ş., H.Cavid prosp., 25. AzTU.

<https://proceedings.aztu.edu.az>, E-mail: elmieserler@aztu.edu.az, DOI: 10.61413/XTJT2525

Azərbaycan Texniki Universitetinin “Elmi əsərlər” jurnalında fizika, riyaziyyat, kimya, mexanika, avtomatika, informatika, telekommunikasiya, maşınqayırma, elektrotexnika, metallurgiya, maşınşünaşlıq, energetika, iqtisadiyyat, nəqliyyat, ekologiya bölmələri üzrə məqalələr və qısa məlumatlar dərc edilir.

Articles and brief information on physics, mathematics, chemistry, mechanics, automatics, informatics, telecommunications, machine-building, electrical engineering, metallurgy, theoretical engineering, energetics, economics, transport, ecology are published in the journal “Proceedings” of Azerbaijan Technical University.

В журнале «Ученые записки» Азербайджанского Технического Университета публикуются статьи и краткие сообщения по физике, математике, химии, механике, автоматике, информатике, телекоммуникациям, машиностроению, электротехнике, металлургии, машиноведению, энергетике, экономике, транспорту, экологии.

Jurnal Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının təsdiq etdiyi elmi dərəcə iddiaçılarının əsərlərinin çap edildiyi dövrü elmi nəşrlərin siyahısına daxil edilmişdir.

The journal is included in the list of periodical scientific publications approved by the Higher Attestation Commission under the President of the Republic of Azerbaijan where the works of scientific degree candidates are published.

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, в которых публикуются работы соискателей ученых степеней, утверждаемый Высшей аттестационной комиссией при Президенте Азербайджанской Республики.

MÜNDƏRİCAT * CONTENTS * ОГЛАВЛЕНИЕ

Javid Elchin Maharramli, Rafael Ali Mardiyev – Big data analytics for demand forecasting: insights and practices in global and Azerbaijan markets	5–12
Musa Elxan oğlu Rəhimov, Manafəddin Bəşir oğlu Namazov – Zaman seriyası modelləri ilə bank tranzaksiyalarının proqnozlaşdırılması: ARIMA, SARIMA və SARIMAX modellərinin müqayisəli təhlili.....	13–20
Shakir Vilayat Valiyev – Renewable energy consumption and expansion opportunities	21–25
Maliha Sayavush Nifdalizada – Balancing user flow and functionality in medical expert systems	26–32
Təbriz Elcan oğlu Osmanlı – Maşın öyrənməsi əsasında virtual təhsil platformalarında tələbə davranışlarının təhlili	33–40
Mahammadali Gazanfar Aliyev, Arzu Eldar Ibrahimova – Practical integration of ISO 9001 and ISO/IEC 17025 for industrial quality control and technical competence	41–46
Rashid Rashad Mammadov – The evolution of the PDCA cycle in the calibration process: from procedural compliance to a strategic, risk-based paradigm	47–53
Elvin Elshad Nasirov – Hybrid modeling approaches in smart manufacturing: integrating digital twins and AI for process optimization	54–58
Nizami Dəmir oğlu Yusubov, Heyran Mürşid qızı Abbasova, Ramil Yengibar oğlu Dadaşov – RPİ dəzgahlarında konik səthlərin emal dəqiqliyinin modelləşdirilməsi	59–67
Ürfan Rəhman oğlu Mirzəyev, Elşən Feyruz oğlu Sultanov – Korroziyadan mühafizədə innovativ texnologiyaların tətbiqinin təhlili.....	68–72
Heybətulla Mabud oğlu Əhmədov, Qəzənfər Nəsrulla oğlu Axundov – Turizm logistikasının nəqliyyat təminatındakı təsərrüfatlardan kompleks istifadə tədbirlərinin genişləndirilməsi	73–77
Rahid Zahid Alekberli – Extending the strategic data alignment framework (SDAF): policy and regulatory implications of Big Data governance in Caspian Basin Ports	78–85
Javid Yashar Abbasli – Hybrid fuzzy-evolutionary framework for multi-criteria drug selection in personalized medicine.....	86–93
Məmməd Aydın oğlu Abdullayev – Mikrodalğa diapazonunda işləyən fazlaşdırılmış antena qəfəsinin modelləşdirilməsi.....	94–101
İlahə Həsən qızı Qəhrəmanova – PUA-larda kriptografik protokollar sahəsində mövcud yanaşmaların analizi	102–108

BIG DATA ANALYTICS FOR DEMAND FORECASTING: INSIGHTS AND PRACTICES IN GLOBAL AND AZERBAIJAN MARKETS

Javid Elchin Maharramli¹, Rafael Ali Mardiyev²

¹“IDS Borjomi Azerbaijan” LLC, Baku, Azerbaijan: maharramli.javid@gmail.com

ORCID: 0009-0007-0798-0143

²Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan: rafael.mardiyev@gmail.com

Abstract. This article examines the critical role of advanced inventory management and demand forecasting techniques within the retail sector of Azerbaijan, set against a backdrop of rapid market changes and economic fluctuations. Traditional methods relying on historical data often fall short in addressing the dynamic nature of consumer demand. By leveraging Big Data analytics, businesses can uncover significant patterns through modern methodologies like machine learning, exponential smoothing, and linear regression, enabling more precise forecasting than conventional approaches. Advanced Tools of Microsoft Excel, such as Power BI, play a vital role in this transformation, allowing companies to analyze real-time data and make informed decisions aligned with market trends. However, the adoption of these advanced technologies comes with challenges, including data integration issues and the need for employee training. Despite these hurdles, the integration of Big Data tools is essential for retail companies in Azerbaijan to enhance operational efficiency and profitability. This article highlights the importance of refining demand forecasting practices to improve inventory management and supports the development of innovative strategies that can better respond to consumer needs in a competitive landscape. Ultimately, it emphasizes that effective adoption of analytics can significantly boost market performance and business resilience.

Keywords: Azerbaijan, Demand Forecasting, Big Data Analytics, Inventory Management, Supply Chain.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Introduction

In today's fast-paced markets, inventory management is key to balancing product availability and costs. Traditional forecasts based only on historical data often fail under rapid economic change, as seen in Azerbaijan, where retail still faces mismatches between production and consumption.

Big Data analytics is transforming inventory management and demand forecasting. Using large datasets and tools such as machine learning, exponential smoothing, moving averages, simple linear regression, Power BI, and advanced Excel, companies can work with near real-time data, reveal patterns, and achieve more accurate forecasts than with traditional seasonal models. These tools help Azerbaijani retailers collect, process, and visualize data, improving understanding of market dynamics and supporting data-driven decisions.

However, adopting these technologies brings challenges: integrating data from different systems, training employees, and ensuring data quality, since errors in source data cause incorrect forecasts.

Despite these issues, using Big Data tools is essential for Azerbaijani businesses to stay competitive. Data-driven forecasting improves operational efficiency, aligns inventory with changing demand, and supports profitability and stronger market positions. As Big Data technologies advance, companies can further increase forecasting accuracy, react faster to market shifts, and enhance their competitive edge.

Research Objective

The primary objective of this research is to examine how Big Data analytics can improve demand forecasting accuracy in Azerbaijan's retail sector. It analyzes techniques such as machine learning, statistical methods, and their integration with tools like Power BI and advanced Excel to identify best practices for more accurate demand predictions. The study reviews current forecasting methods in retail using quantitative data from sales records and consumer behavior, compares them with global benchmarks, and offers practical recommendations for Azerbaijani retailers to optimize inventory management and better align with market demand.

Advances in data collection and analytics now enable more precise demand forecasting. Big Data has become a key part of decision-making, especially thanks to real-time and low-latency monitoring of business events. This research uses retail datasets with weekly, monthly, and annual sales from different companies for 2015–2024, providing insight into consumer behavior and demand patterns over time. The study focuses on seasonality, promotion effects, and regional differences, all crucial for inventory optimization. Including small and medium-sized enterprises (SMEs) ensures that the results are relevant to a wide segment of the Azerbaijani retail market and help identify strategies to improve forecasting accuracy and operational efficiency.

Problem Statement

In today's fast-paced markets, inventory management is essential for balancing product availability and cost control. Traditional forecasting methods based only on historical data often fail under rapid economic and market changes, as seen in Azerbaijan, where the retail sector still faces mismatches between production and consumption.

Big Data analytics is transforming inventory management and demand forecasting. By using large datasets and methods such as machine learning, exponential smoothing, moving averages, and simple linear regression, companies can work with near real-time data, identify patterns, and improve forecast accuracy compared with traditional seasonal models. Tools like Power BI and advanced Excel help Azerbaijani retailers collect, integrate, process, and visualize data, providing a clearer picture of market dynamics and supporting data-driven decisions aligned with consumer trends.

However, the transition to these tools creates challenges: integrating data from different systems, training employees to use advanced features, and ensuring high data quality, since errors in source data lead to unreliable forecasts.

Despite these difficulties, adopting Big Data tools is vital for Azerbaijani businesses to remain competitive, improve operational efficiency, and align inventory strategies with changing demand.

Problem-solving methods and Approbation

This article outlines various problem-solving methods utilized in demand forecasting, emphasizing traditional statistical techniques, Integration with Microsoft Excel advanced tools, machine learning, and AI technologies. These methodologies offer structured approaches to analyzing data and predicting consumer demand.

Traditional statistical methods, such as Simple Linear Regression, Moving Average, and Exponential Smoothing, provide foundational tools for understanding historical sales patterns. Simple Linear Regression predicts demand (Y) based on influential factors (X), while Moving Average and Exponential Smoothing help identify underlying trends by reducing short-term fluctuations.

Leading organizations, such as “Danone” and “IDS Borjomi Georgia”, apply these problem-solving methods to refine their forecasting processes. Danone utilizes the SAP planning tools and Microsoft Excel advanced tools to enhance its forecasting capabilities in the dairy market, allowing for swift supply chain adjustments. Borjomi employs Microsoft Dynamics, JDA, and Power BI for advanced statistical techniques and AI, aligning its demand forecasting with consumer preferences [Author].

Demand Forecasting Calculation Techniques:

Simple Linear Regression:

$$[Y = a + bX] \quad (1)$$

Explanation:

(Y) represents the predicted demand that we seek to estimate based on past data.

(a) is the Y-intercept, the expected demand value when the independent variable (X) is zero.

(b) is the slope of the regression line, which indicates the change in demand for each unit increase in (X) is the independent variable used to explain the changes in demand, which could include historical sales data or marketing expenditure.

Using this formula, analysts gather data on demand about one or more predictive variables. By applying statistical techniques, businesses can structure their forecasting models to estimate future demand based on current trends and historical data.

Integration with Microsoft Excel tools

Evaluations of demands that are still in the process of being fulfilled or have already been satisfied are called latent demand for needs.

Latent demand refers to potential demand that has not yet been expressed in actual purchases but may materialize if certain conditions are met, such as price changes, product availability, or marketing efforts. Low-latency analytics describes the capability to process and analyze data with minimal delay, enabling near real-time decision-making. In the context of retail, this means that sales and inventory data can be monitored and reacted to on a daily or even hourly basis. The market needs can only be forecasted without any strict indicators if they have not yet been expressed in demand, intentionally or unintentionally [6]. An example of the weekly Demand Calculation techniques of the Azerbaijan representative of the Danone company (Table 1).

Table 1

Calculation of Demand Forecast and order quantity based on historical data
(weekly short-term forecast for Danone Azerbaijan LLC)

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2	Product name	W32	W33	W34	W35	W36	Average sales in pcs	Actual stock	Stock in Transit	Average daily sales	Needed for week	Coverage check for week	DOS coverage check	Demand Forecast	Safety stock days	Safety stock PCS	Order
3	CHEESE 170 STRAWBERRY	2673	2857	2830	2580	3056	2799	1281	3200	616	4312	169	0,3	2799	1	616	3246
4	CHEESE 170 PEACH	2032	2431	2542	2444	2890	2468	564	3200	543	3801	0	0,0	2468	1	543	3011
5	YOGHURT 150 NATURAL	3487	3480	3525	3521	3875	3578	2370	6360	788	5516	3214	4,1	3578	1	788	1152
6	YOGHURT 150 BANANA	5538	6672	5846	4804	5579	5688	3611	10800	1252	8764	5647	4,5	5688	1	1252	1293
7	YOGHURT 150 PRUNES	7899	11790	8964	6547	10795	9199	4215	15600	2024	14168	5647	2,8	9199	1	2024	5576
8	DRINK 270 PEACH	2160	2731	1247	1678	682	1700	1	0	340	3400	0	0,0	1734	2	680	2414
9	DRINK 270 NUTS	2226	2884	2522	2469	606	2141	1	0	429	4290	0	0,0	2184	2	858	3042
10	PRO BUTTER 180 82%	85	195	1407	144	342	435	0		87	609	0	0,0	443	1,5	130,5	574
11	PRO MILKUP 950 0,5%	630	772	0	759	938	620	13	0	124	868	0	0,0	632	10	1240	1872
12	PRO MILKUP 950 1,5%	1679	2943	0	4013	964	1920	612	0	384	2688	0	0,0	1920	10	3840	5760
13	PRO MILKUP 950 2,5%	2765	4016	0	3835	2616	2646	14	0	530	3710	0	0,0	2699	10	5300	7999
14	PRO MILKUP 950 3,2%	2054	5861	0	5491	3804	3442	54	0	689	4823	0	0,0	3511	10	6890	10401
15	TOTAL	33228	46632	28883	38285	36147	36635	12736	39160	7806	56949	14677		36855		24162	46340

Source: [Author 2020].

Explanation:

Average weekly sales (Column “G”): = Average of 5 weeks' sales data:

$$[\text{AVERAGE}(B3:F3)] \quad (2)$$

Average daily sales (Column “J”): = Average of 5 weeks divided by 5 working days:

$$[\text{CEILING}(\frac{I4}{5} \cdot 1.1, 0)] \quad (3)$$

Coverage check for 1 week (Column “L”): = If Actual stock (Column “H”) plus Stock in Transit (Column “I”) minus Needed stock for 1 week (Column “K”) is below zero, it means we cannot cover next week sale, If this formula above zero, we need to check how many days do we cover:

$$[\text{IF}(H2 + I2 - K2 < 0, 0, H2 + I2 - K2)] \quad (4)$$

DOS (Days of Outstanding Sales) (Column “M”): = Coverage check for week (Column “L”) divided by Average daily sales (Column “J”)

$$\left[\frac{L2}{J2} \right] \quad (5)$$

Demand Forecast calculation (Column “N”): = If Actual stock (Column “H”) is below Average daily sales (Column “J”), it means we don’t have yet stock even for 1 day sale so we need to get as the demand, average weekly sales quantity +20% (growing trend indicator) which is indicated in (Column “G”) if actual stock above 1 day sale we get as a demand 100% of average 5 week sales.

$$[\text{ROUND}(\text{IF}(H2 < J2, G2 \cdot 1.02, G2), 0)] \quad (6)$$

Order quantity calculation (Column “Q”): = If the Demand forecast (Column “N”) plus Safety Stock (Column “P”) minus Coverage for week sale (Column “L”) is below zero, it means no need for ordering any quantity, if above zero we ordering the quantity with calculating Demand forecast (Column “N”) plus Safety Stock (Column “P”) minus Coverage for week sale (Column “L”).

$$[\text{ROUND}(\text{IF}(N2 + P2 - L2 < 0, 0, N2 + P2 - L2), 0)] \quad (7)$$

Data for this report were gathered from various business units to assess the demand-supply balance for glass products. Analysis was performed using Power BI and the JDA program, crucial for processing large datasets and improving decision-making, especially in predicting production capacity. Utilization remains high until October, with Glass 2 production slated to begin in November, primarily allocated to the Geo region. The stock target will be managed within one month, focusing on KZ and RU regions, with KZ production details pending confirmation (Figure 1).

GLASS Demand-Supply Balance 2024

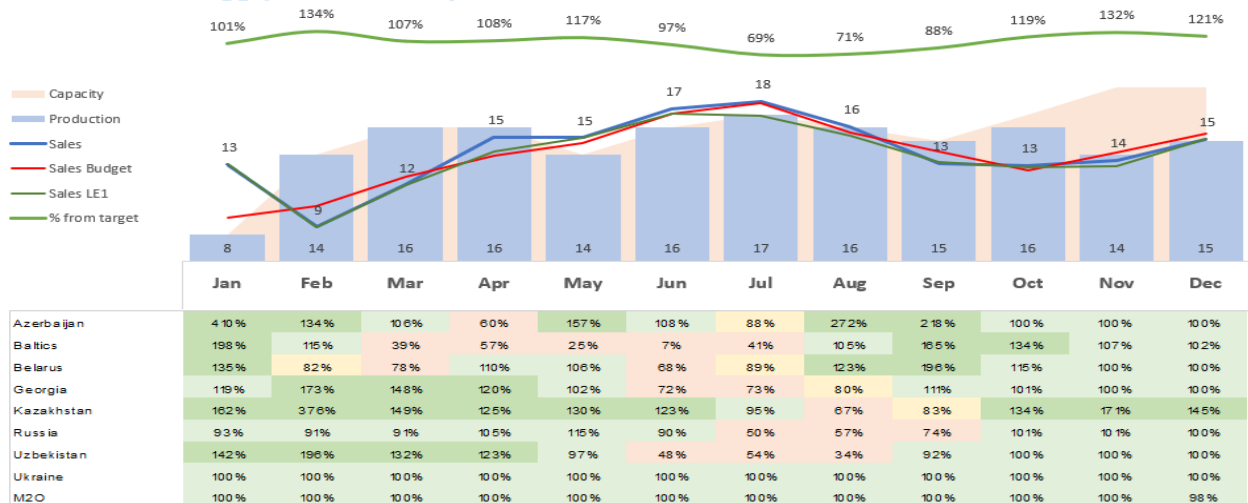


Figure 1. Last estimation of the Demand-Supply balance (Glass products) calculation report for “IDS Borjomi Georgia” LLC) [Author 2024]

Key Time Series Forecasting Techniques

$$\text{Moving Average: } [MA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} Y_{t-i}] \quad (8)$$

Explanation:

(MA_t) gives the moving average at time (t).

(n) is the number of past periods (for instance, months or weeks) used to calculate the average, which can smooth out short-term fluctuations.

(Y_{t-i}) represents the observed sales values at previous periods (from the most recent back to the (nth) previous period).

The moving average helps identify underlying trends in sales data by filtering out random variations, thus providing a clearer view of demand patterns over time (Figure 2).

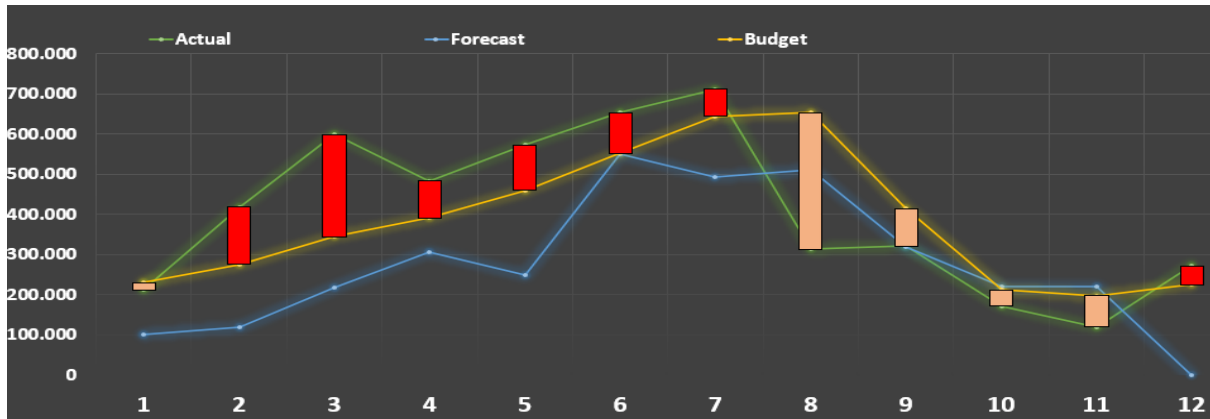


Figure 2. Annual 2023 forecast, demand and budget fluctuations diagram with demonstrating trends and seasonality of IDS Borjomi Azerbaijan. Source: [Author 2023]

Exponential Smoothing:

$$[S_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha) S_{t-1}] \quad (9)$$

Explanation:

(S_t) is the smoothed forecast value for the current period.

(Y_t) is the actual demand observed in the current period.

(S_{t-1}) is the forecasted value from the previous period.

The parameter (α) (smoothing constant) determines how much weight is given to the most recent observation versus the previous forecast, with values between 0 and 1.

Machine Learning Algorithms Techniques

Machine learning algorithms significantly enhance demand forecasting and operational efficiency by analyzing patterns within historical datasets. These algorithms adjust and improve as more data becomes available.

Evaluation Metrics for Forecast Accuracy. Mean Absolute Error (MAE):

$$[MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |Y_t - \hat{Y}_t|] \quad (10)$$

Explanation:

(Y_t) is the actual demand at time (t).

($\hat{Y}_t$) is the forecasted demand at time (t).

(N) is the total number of forecasts evaluated.

MAE measures average forecasting errors, serving as a key metric for assessing accuracy and helping businesses reduce discrepancies between forecasted and actual demand [5].

Mean Absolute Percentage Error (MAPE):

$$[\text{MAPE} = \frac{100}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{Y_t - \hat{Y}_t}{Y_t} \right|] \quad (11)$$

Explanation:

Similar to MAE, but assesses the errors as a percentage of the actual demand.

MAPE allows organizations to understand forecast performance relative to the scale of actual sales, making it easier to compare accuracy across different products or market segments (Table 2).

Table 2

Calculation of Monthly Forecast Accuracy (MFA) for “IDS Borjomi Azerbaijan” LLC)
on an example of the Annual 2024 total

ANNUAL 2024	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	TOTAL
Forecast	128838	175590	310253	357219	381367	558237	642363	430945	327248	321768	258445	247896	4140169
Actual	110637	143891	253154	341292	379593	575217	638000	526826	325830	321542	343818	333815	4293615
Error	40122	59497	86361	116151	117320	70016	100496	166969	96143	71082	134323	107446	1165926
MFA	64%	59%	66%	66%	69%	88%	84%	68%	70%	78%	61%	68%	75%

Source [Author 2024]

Explanation:

Absolute value of a number (ABS) calculation:

$$[\text{ABS}(\{\text{Actual}\} - \{\text{Forecast}\})] \quad (12)$$

Forecast Accuracy (FA) calculation: If 100% minus “Error” is divided by Forecast below zero, then the value will be zero; otherwise, the value will be 100% minus “Error” divided by “Forecast”.

$$[\text{IF} \left(1 - \frac{\text{Error}}{\text{Forecast}} < 0, 0, 1 - \frac{\text{Error}}{\text{Forecast}} \right)] \quad (13)$$

This graph presents key insights into the forecasts and actual performance metrics for 2024. It highlights the relationship between expected and achieved results, along with error rates in the forecasts. Analyzing this data will enhance understanding of trends and inform decision-making processes (Figure 3).

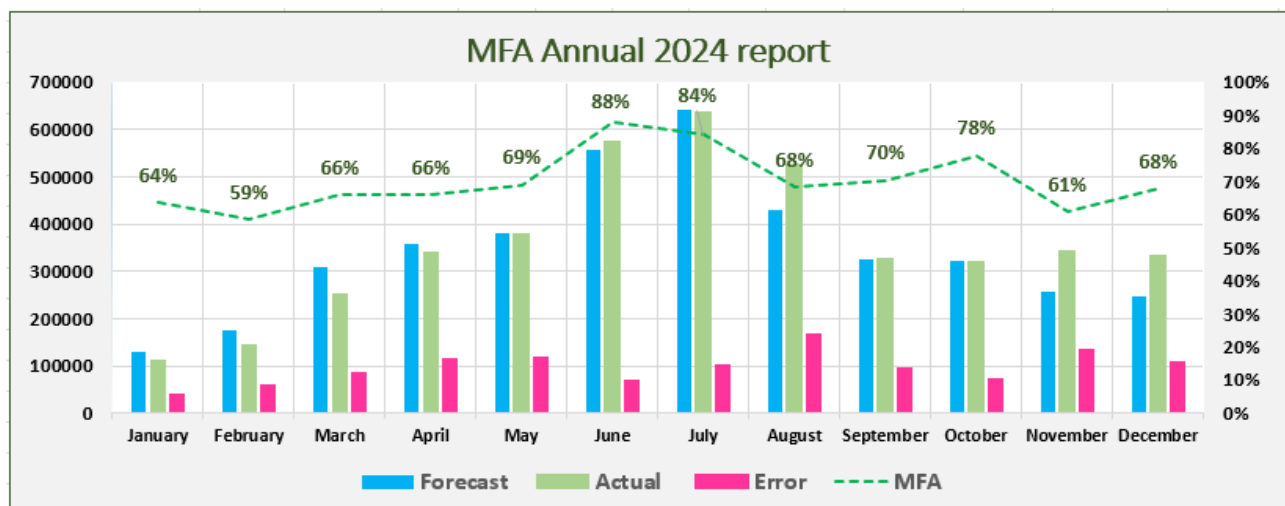


Figure 3. Visualisation of MFA report 2024. Source: [Author]

Calculation test

The graph demonstrates that the evaluation of demand planning and inventory calculation methodologies, as referenced in the article, was executed using the Power BI platform. This analysis is encapsulated under the section titled "Relevant Calculation Tests from the Power BI Tool," highlighting the effectiveness and precision of the calculations performed (Figure 4).

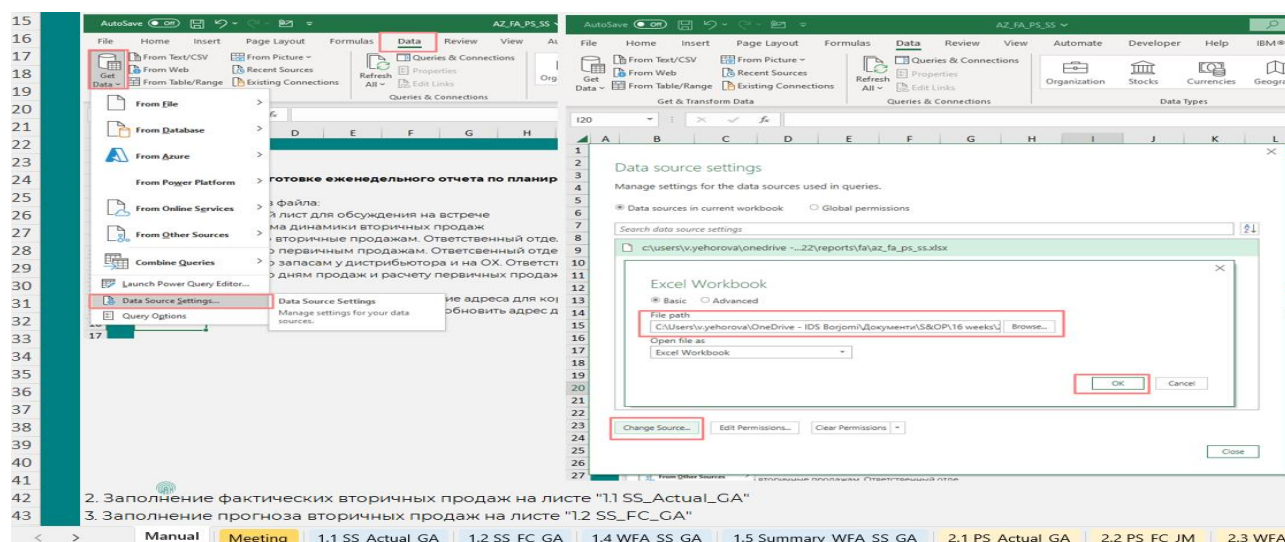


Figure 4. Relevant calculation tests from the Power BI tool. Source: [Author]

Comparative analysis Global VS Azerbaijan

To systematically understand the current activities of Azerbaijani companies in the application of inventory management strategies and approaches, 26 interviews were conducted both in local large companies in various sectors such as retail, energy, pharmaceuticals, manufacturing.

The interviews involved professionals from 20 companies of various positions in the supply chain area (Figure 5).

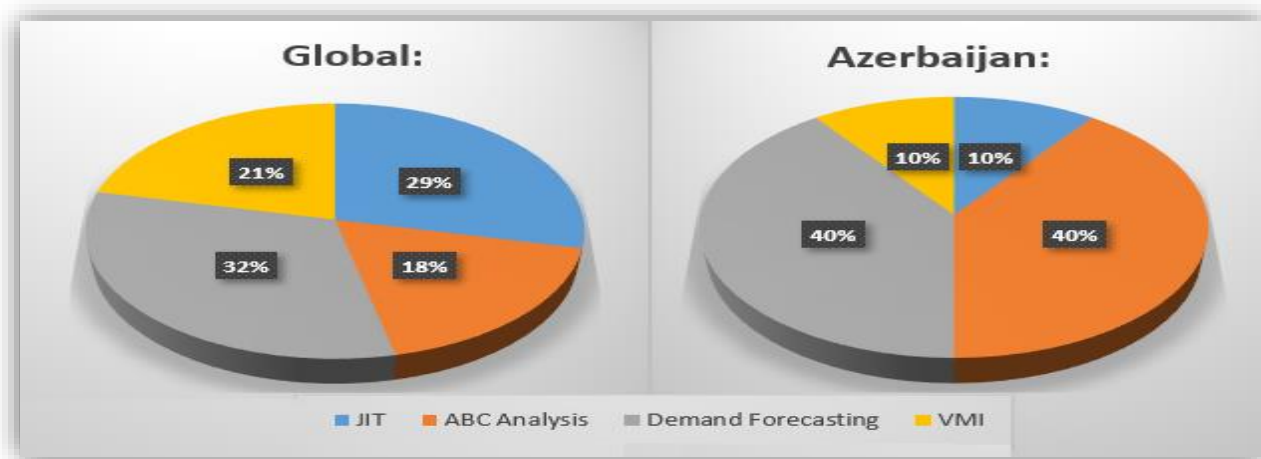


Figure 5. Pie chart of Global VS Azerbaijan IM key Aspects by %
Source: Created by (Author) based on www.netstock.com (Netstock Research)

Conclusion

This study highlights the profound impact of Big Data analytics on enhancing demand forecasting accuracy in Azerbaijan's retail market. Among the methodologies analyzed, machine learning algorithms stand out as the most effective for addressing demand planning challenges. These

advanced techniques enable real-time data analysis and pattern recognition, resulting in more precise forecasts than traditional methods like Simple Linear Regression and Exponential Smoothing.

Companies such as Danone and IDS Borjomi Georgia exemplify the successful use of these methodologies, employing tools like Power BI and advanced Microsoft Excel functions to optimize inventory management and reduce costs. Their integration of data-driven techniques illustrates how organizations can align supply chains more effectively with changing consumer demands.

Moreover, collaboration among industry leaders enhances knowledge sharing, fostering improved forecasting practices that can address the unique challenges in Azerbaijan's market. Future research should explore the ongoing evolution of these methodologies and how further advancements in collaborative data practices can strengthen the role of Big Data analytics in demand planning, ensuring business competitiveness in a dynamic economic landscape.

REFERENCES

1. Huseynov A.S., & Hesenova I.M. The role of enterprise resource planning ERP systems in the supply chain. UNEC, Scientific works, 1996, pp. 137–142. <https://doi.org/10.58225/tim.2024-2-137-142>
2. He L. (n.d.). Multi-Echelon Inventory Optimization and Demand-Side Management: Models and Algorithms. pp. 50-62. http://preserve.lehigh.edu/etd?utm_source=preserve.lehigh.edu%2Fetd%2F1504&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages
3. Lei Y., Qiaoming H., & Tong Z. Research on Supply Chain Financial Risk Prevention Based on Machine Learning. Computational Intelligence and Neuroscience, 2023(1), 6531154. pp. 5-14. <https://doi.org/10.1155/2023/6531154>
4. Nozari H., Szmelter-Jarosz A., & Ghahremani-Nahr J. Analysis of the Challenges of Artificial Intelligence of Things (AIoT) for the Smart Supply Chain (Case Study: FMCG Industries). Sensors, 22(8), 2931, 2022, pp. 3-5. <https://doi.org/10.3390/s22082931>
5. Petropoulos F., Grushka-Cockayne Y., Siemsen E., & Spiliotis E. Wielding Occam's razor: Fast and frugal retail forecasting (No. arXiv:2102.13209). 2023. pp. 4-14. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.13209>
6. Schnegg M., & Möller K. Strategies for data analytics projects in business performance forecasting: A field study. Journal of Management Control. 33(2), 2022, pp. 241–271. <https://doi.org/10.1007/s00187-022-00338-7>
7. Shenhao L. (n.d.). Walmart's Data Analytics for Optimised Inventory and Customer Insights. pp.2-4. https://www.researchgate.net/publication/377272036_ARTICLE_TITLE_Walmart%27s_Data_Analytics_for_Optimised_Inventory_and_Customer_Insights
8. Taghizadeh E. (n.d.). Utilizing Artificial Neural Networks To Predict Demand For Weather-Sensitive Products At Retail Stores. pp. 3-7. https://www.researchgate.net/publication/321241806_Utilizing_artificial_neural_networks_to_predict_demand_for_weather-sensitive_products_at_retail_stores
9. Vandeput N. Inventory Optimization: Models and Simulations. De Gruyter. 2020, pp. 18-24 <https://doi.org/10.1515/9783110673944>
10. Žunić E., Korjenić K., Delalić S., & Šubara Z. Comparison Analysis of Facebook's Prophet, Amazon's DeepAR+ and CNN-QR Algorithms for Successful Real-World Sales Forecasting. International Journal of Computer Science and Information Technology, 13(2), 2021, pp. 67–84. <https://doi.org/10.5121/ijcsit.2021.13205>

Accepted: 12.12.2025

ZAMAN SERİYASI MODELLƏRİ İLƏ BANK TRANZAKSİYALARININ PROQNOZLAŞDIRILMASI: ARIMA, SARIMA VƏ SARIMAX MODELLƏRİNİN MÜQAYİSƏLİ TƏHLİLİ

Musa Elxan oğlu Rəhimov, Manafəddin Bəşir oğlu Namazov
Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan

FORECASTING BANK TRANSACTIONS WITH TIME SERIES MODELS: A COMPARATIVE ANALYSIS OF ARIMA, SARIMA AND SARIMAX

Musa Elxan Rahimov, Manafaddin Bashir Namazov

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

musarehimov10@gmail.com, manafeddin.namazov@aztu.edu.az

<https://orcid.org/0009-0009-0961-5064>, <https://orcid.org/0000-0003-1119-2442>

Abstract. The article applies ARIMA, SARIMA and SARIMAX models to forecast transaction volumes in the banking sector. The ARIMA model adjusts only for trend and stationarity effects, SARIMA also takes into consideration seasonal effects, and SARIMAX additionally increases the accuracy of the forecast by including the exogenous feature "Transaction Growth". The "Transaction Growth" feature is created using feature engineering and reflects changes in transaction volumes as a percentage value. The purpose of this feature is to improve the performance of models by providing deeper analysis of data.

Different performance metrics such as RMSE, MAE, R^2 , MAPE, sMAPE and MBE were applied to evaluate the performance of the models. The results obtained from the SARIMAX model indicate that this model provides the highest accuracy in comparison with other models: RMSE (22.61), MAE (17.48), R^2 Score (0.9125), MAPE (4.05%), sMAPE (4.04%) and MBE (-0.33).

This study shows that the use of the "Transaction Growth" feature created through feature engineering in the models significantly increases the accuracy of time series forecasts. The advantage of the SARIMAX model in predicting transaction volumes in the banking sector is the most noticeable benefit of the study.

Keywords: Time Series Forecasting, ARIMA, SARIMA, SARIMAX, Feature Engineering, Banking Sector, Exogenous Variables.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Giriş

Zaman seriyası analizi statistik modelləşdirmə sahəsində geniş tətbiq olunan və müxtəlif sahələrdə proqnozlaşdırma üçün istifadə edilən bir yanaşmadır. Xüsusilə bank sektorunda tranzaksiya əməliyyatlarının proqnozlaşdırılması, maliyyə idarəçiliyi və müştəri davranışlarının analizi baxımından əhəmiyyətli hesab olunur. Zaman seriyası modellərinin əsas məqsədi əvvəlki məlumatlardan istifadə edərək gələcəkdə baş verə biləcək dəyişiklikləri dəqiqliklə proqnozlaşdırmaqdır. Bu məqsədlə ənənəvi ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) modeli tədqiqatlarda geniş vüsət tapmışdır. ARIMA modeli zaman seriyasındakı trend və stasionarlıq kimi təsirləri modelləşdirmək üçün istifadə olunur [1, s. 203-248].

Mövsümi dəyişikliklərin modelləşdirilməsində SARIMA modeli, trend, stasionarlıq və mövsümlük kimi təsirləri birgə modelləşdirmək üçün effektiv bir yanaşma təqdim edir [2, s. 401-450]. Daha geniş bir perspektiv təmin etmək üçün SARIMAX modeli təqdim edilmişdir. SARIMAX modeli, ekzogen dəyişənlərin daxil edilməsi ilə proqnoz dəqiqliyini artırmağa imkan verir [3, s. 131-170]. Bu tədqiqatda "Transaction Growth" (Tranzaksiya Artımı) xüsusiyyətinin SARIMA modelinə daxil edilməsi əsas yenilik kimi vurğulanmışdır.

"Transaction Growth" xüsusiyyəti xüsusiyyət mühəndisliyi vasitəsilə yaradılmışdır və maliyyə əməliyyatlarının intensivliyini faiz dəyəri olaraq əks etdirir. Bu yanaşma, məlumatların dərin təhlilini təmin etməklə modellərin performansını artırmağa xidmət edir [4, s. 1-35]. Xüsusiyyət mühəndisliyi üsulu ilə yaradılmış bu xüsusiyyətin mövcud modellərin performansına necə təsir etdiyini araşdırmaq bu tədqiqatın əsas məqsədlərindən biridir.

Stasionarlığı təmin etmək üçün məlumatlar fərqləndirmə üsulu ilə işlənmiş və ADF (Augmented Dickey-Fuller) testi vasitəsilə modelləşdirmə üçün uyğunluğu yoxlanılmışdır. Modellər

70-30 nisbətində təlim və test dəstlərinə bölünərək kalibrlənmişdir. Performansın qiymətləndirilməsi üçün RMSE, MAE, R^2 və MAPE kimi müxtəlif metriklər tətbiq edilmişdir. Bu metriklər təkcə proqnoz dəqiqliyini deyil, həm də modellərin proqnoz səhvlərini təsvir etmək üçün istifadə olunmuşdur [5].

Bu tədqiqat zamanı əsas tədqiqat sualları bunlardır:

1. "Transaction Growth" xüsusiyyətinin daxil edilməsi zaman seriyası modellərinin proqnoz dəqiqliyinə necə təsir edir?

2. Mövsümi təsirlərin modellərə inteqrasiyası ümumi performansı nə qədər töhfə verir?

3. ARIMA, SARIMA və SARIMAX modellərinin üstünlükləri və çatışmazlıqları nədir?

Nəticədə, bu tədqiqat zaman seriyası modellərinin bank sektorundakı tətbiqinə nəzər salmaqla yanaşı, mövcud metodların performansını artırmaq üçün təklif olunan yenilikləri də qiymətləndirir. Bu yanaşma, həm akademik, həm də tətbiqi tədqiqatlar üçün yeni perspektivlər açmağı hədəfləyir.

Ədəbiyyat İcmalı

Zaman seriyası analizi iqtisadiyyat və maliyyə sahələrində geniş tətbiq olunan bir metodologiyadır. Xüsusilə bank sektorunda bu yanaşmaların tətbiqi proqnozlaşdırma və qərar qəbul etmə proseslərinin effektivliyini artırır. Zaman seriyası modellərinin əsasları ilə bağlı ilkin anlayışlar Chatfield tərəfindən təqdim edilmişdir [6, s. 1-20]. Müəllif zaman seriyası analizinin fundamental prinsiplərini izah edərək, bu yanaşmanın bank sektorunda proqnozlaşdırma üçün necə istifadə oluna biləcəyini göstərmişdir.

Hamilton ARIMA və SARIMA modellərinin əsaslarını təqdim edərək, onların iqtisadi və maliyyə tətbiqlərinə xüsusi vurğu etmişdir [7, s. 103-190]. Müəllif, bu modellərin müxtəlif təsirləri modelləşdirərək gələcək proqnozların dəqiqliyini artırmaq üçün necə istifadə oluna biləcəyini izah etmişdir. Bu yanaşma Diebold və Mariano tərəfindən təkmilləşdirilmişdir [8]. Müəlliflər proqnoz dəqiqliyini qiymətləndirmək üçün statistik metodlar təqdim etmiş və bu metodların maliyyə sahəsində tətbiqlərinə xüsusi diqqət ayırmışdır.

Brockwell və Davis zaman seriyası analizində geniş spektrli metodları təqdim etmiş, bu yanaşmaların bank əməliyyatlarının modelləşdirilməsi üçün necə tətbiq edilə biləcəyini müzakirə etmişdir [9, s. 53-145]. Bu sahədə Wei həm birölçülü, həm də çoxölçülü zaman seriyası modellərinin maliyyə sahəsinə tətbiqlərini geniş şəkildə izah etmişdir [10, s.245-280]. Xüsusilə, müəllif mövsümi təsirlərin modelləşdirilməsinin vacibliyini vurğulamışdır.

Mövsümi təsirlərin daha yaxşı modelləşdirilməsi ilə bağlı Taylor ikiqat mövsümi hamarlaşdırma yanaşmalarını təqdim etmişdir [11]. Bu yanaşma elektrik tələbinin proqnozlaşdırılmasında istifadə edilmişdir, lakin bu metod bank sektorundakı mövsümi təsirlərin analizi üçün də əhəmiyyətliyəldir. Mills və Patterson isə iqtisadi analizlərdə zaman seriyası modellərinin tətbiqi ilə bağlı geniş nəzəriyyələri təqdim etmişdir [12, s. 380-420].

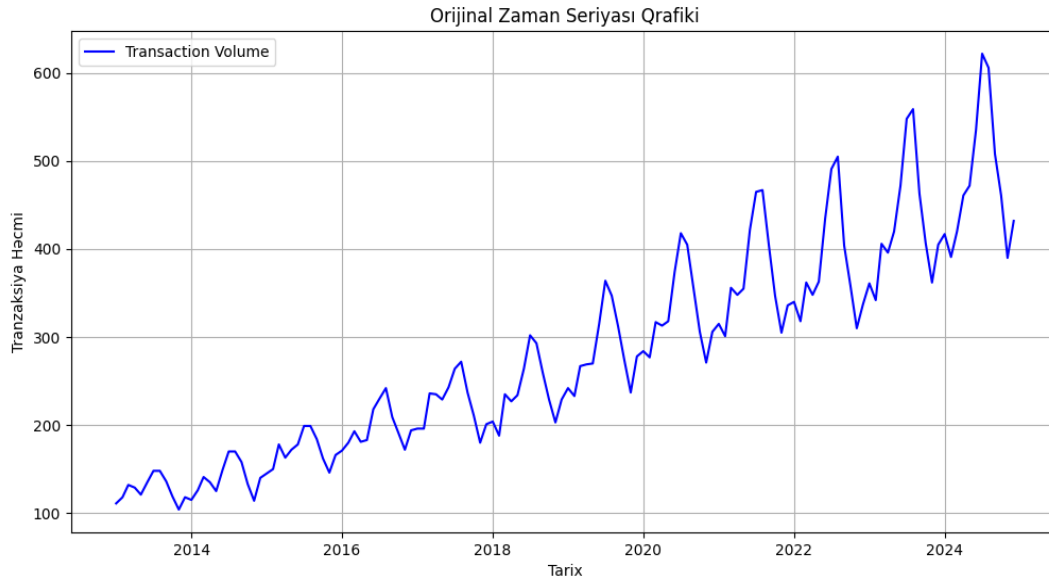
Box-Steffensmeier və digərləri zaman seriyası analizinin sosial elmlərdəki tətbiqlərini müzakirə etmişdir [13, s. 55-110]. Onların yanaşması maliyyə sektorunda istifadə edilə bilən modellərin sosial təsirlərini araşdırmağa imkan verir. Gujarati və Porter isə ARIMA və SARIMA modellərinin iqtisadi tətbiqlərini xüsusi olaraq təhlil etmiş və bu modellərin bank sektorunda tətbiqi üçün əsasları izah etmişdir [14, s. 603-650].

Fildes və Goodwin tərəfindən aparılmış tədqiqat proqnozlaşdırma strategiyalarını müzakirə edərək, bank sektorundakı tətbiqlərdən əldə edilən dərsləri təqdim etmişdir [15]. Bu yanaşma, proqnozlaşdırmanın keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması və strateji qərarların dəstəklənməsi üçün vacib olan anlayışları əhatə edir.

Ümumilikdə, bu ədəbiyyatlar göstərir ki, ARIMA, SARIMA və SARIMAX modellərinin tətbiqi ilə yanaşı, ekzogen xüsusiyyətlərin daxil edilməsi proqnoz dəqiqliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Bank sektorunda bu yanaşmaların tətbiqi həm nəzəri, həm də praktiki baxımdan böyük əhəmiyyətə malikdir.

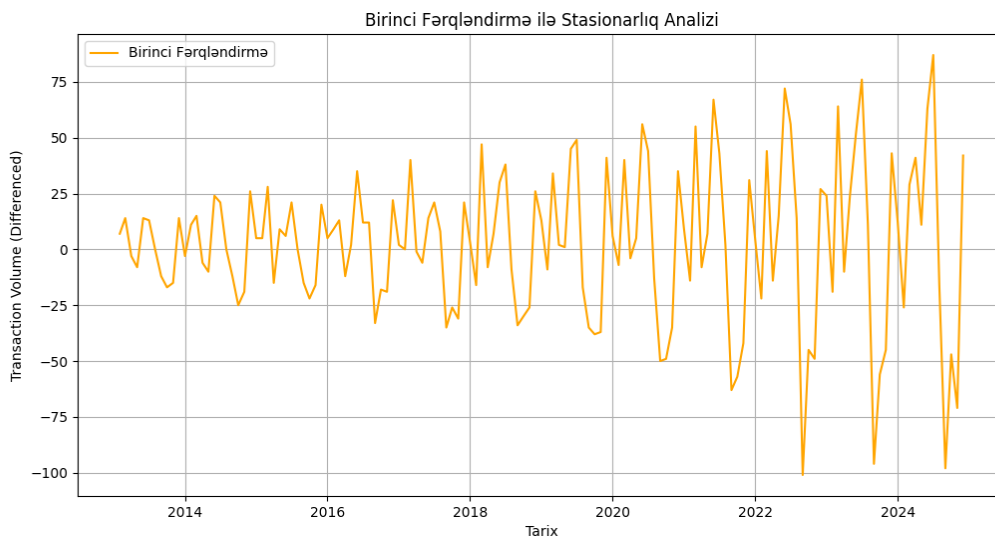
Məlumatlar və ilkin təhlil

Məqalənin bu hissəsində tədqiqatda istifadə edilən zaman seriyası məlumatlarının xüsusiyyətləri təsvir edilir. Şəkil 1-də tranzaksiya əməliyyatlarının zamanla necə dəyişdiyi əks etdirilir və məlumatların ümumi davranışını göstərilir. Məlumat dəstindəki istifadəçi məlumatları tam anonimləşdirilmişdir. 2013-cü il ilə 2024-cü ilə qədər olan zaman aralıqları üçün tranzaksiya əməliyyatlarının sayı "Transaction Volume" xüsusiyyəti adı altında saxlanılmışdır.

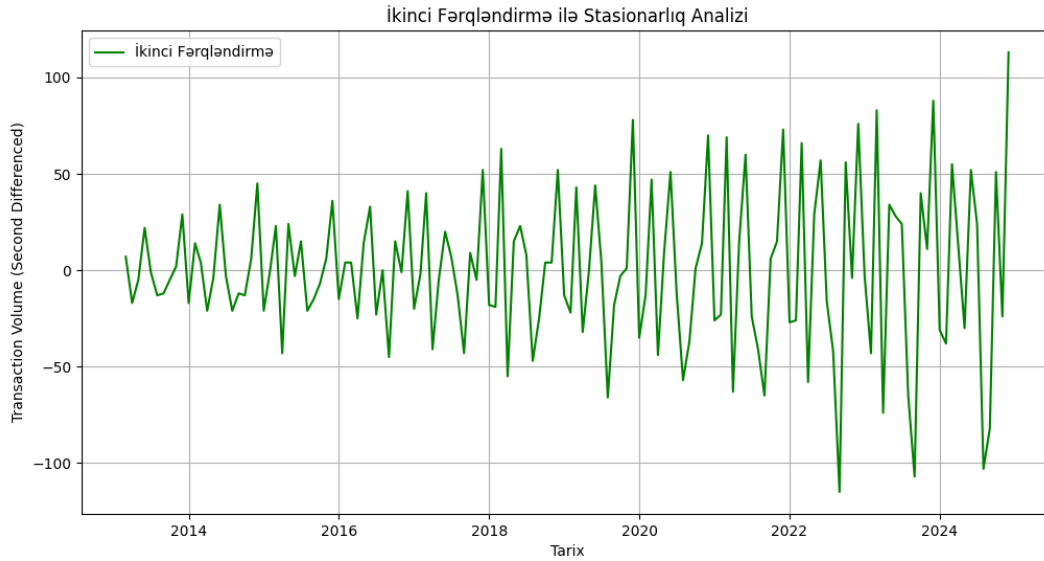


Şəkil 1. Tranzaksiya həcmələrinin müxtəlif illər üzrə dəyişimi

Zaman seriyası analizi üçün əsas məlumat mənbəyi "Transaction Volume" göstəricisidir. Bu göstəricinin stasionarlığını müəyyən etmək üçün ADF (Augmented Dickey-Fuller) testi tətbiq edilmişdir. Əldə olunan nəticələr göstərir ki, orijinal zaman seriyası stasionar deyil (P-Value: 0.9917). Şəkil 2-də birinci fərqləndirmənin tətbiqindən sonra məlumatların stasionarlığa yaxınlaşması göstərilmişdir (P-Value: 0.0570), lakin tam stasionar olmamışdır. Şəkil 3-də ikinci fərqləndirmənin tətbiqindən sonra seriyanın tam stasionar vəziyyətə keçməsi göstərilmişdir (P-Value: 2.49e-29).



Şəkil 2. Birinci fərqləndirmə ilə stasionarlıq analizi



Şəkil 3. İkinci fərqləndirmə ilə stasionarlıq analizi

Metodologiya

Bu tədqiqatda zaman seriyası proqnozlaşdırılması üçün üç fərqli statistik model tətbiq edilmişdir: ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average), SARIMA (Seasonal ARIMA) və SARIMAX (Seasonal ARIMA with exogenous Variables).

ARIMA modeli trend və stasionarlıq təsirlərini nəzərə almaqla aşağıdakı şəkildə ifadə olunur [1, s. 203-248]:

$$y_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \epsilon_{t-j} + \epsilon_t \quad (1)$$

Burada y_t zaman seriyası müşahidələrini, ϕ və θ isə avtoregressiv (AR) və hərəkətli ortalama (MA) əmsalları ifadə edir. Modelləşdirmə zamanı seriyanın stasionar olub-olmaması Augmented Dickey-Fuller (ADF) testi ilə qiymətləndirilmişdir [16]. Nəticələrə əsasən ikinci dərəcəli fərqləndirmə tətbiq olunmuşdur ($d=2$) [17, s. 215-240].

SARIMA modeli ARIMA-nın mövsümi komponentlər əlavə olunmuş versiyasıdır və aşağıdakı ümumi formulla ifadə olunur [2, s. 401-450]:

$$SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s \quad (2)$$

Burada s mövsümi dövrü, P, D, Q isə mövsümi AR, differencing və MA parametrlərini göstərir. SARIMA modeli seriyanın həm trend, həm də mövsümi strukturlarını modelləşdirmək üçün istifadə olunmuşdur [1, s. 203-248].

Bu tədqiqatda “Transaction Growth” adlı əlavə xüsusiyyət yaradılmış və modelə daxil edilmişdir. Bu dəyişən ardıcıl iki dövr üzrə tranzaksiya həcmnin faizlə dəyişimini göstərir və aşağıdakı formula ilə hesablanmışdır:

$$TG = \left(\frac{T_t - T_{t-1}}{T_{t-1}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Burada T_t – cari dövrdəki tranzaksiya həcmi, T_{t-1} isə əvvəlki dövrdəki həcmi ifadə edir. Bu yanaşma modelə əlavə informativ qat əlavə edərək proqnoz dəqiqliyinin artırılmasına xidmət edir.

Hər bir modelin performansını yoxlamaq üçün aşağıdakı performans metriklərindən istifadə olunmuşdur:

RMSE modeli tərəfindən verilmiş proqnozların faktiki dəyərlərdən orta kvadrat sapmasını ölçür:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (4)$$

MAE proqnoz səhvlərinin orta mütləq qiymətini göstərir. O, proqnoz və faktiki dəyərlər arasındakı orta fərqi qiymətləndirir və modelin orta səhv səviyyəsini sadə şəkildə göstərir [5]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t| \quad (5)$$

R^2 modeli tərəfindən izah olunan variasiyanın faizini göstərir. Dəyərləri 0 ilə 1 arasında dəyişir və 1-ə yaxın olduqda model daha yaxşı nəticə verir. Bu metrik proqnozların nə qədər izahlı olduğunu təhlil etmək üçün istifadə olunur [5]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (6)$$

MAPE səhvlərin faizlə ifadəsini verir və proqnozların nisbi dəqiqliyini ölçmək üçün istifadə olunur. Bu metrik interpretasiyası asan olan və fərqli proqnoz sistemlərini müqayisə etməyə imkan verən geniş istifadə olunan göstəricidir [5]:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right| \quad (7)$$

sMAPE, MAPE-nin simmetrik forması olub proqnoz və faktiki dəyərlərin cəminə bölünən fərqləri hesablayır:

$$sMAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{(|y_t| + |\hat{y}_t|)/2} \quad (8)$$

MBE proqnozlarda sistematik meylin olub-olmadığını göstərir. Əgər bu dəyər müsbətdirsə, model sistematik olaraq artıq proqnoz verir; mənfidirsə, model daim az proqnoz verir [18, s. 155-175]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t) \quad (9)$$

$\hat{y}_t$ model tərəfindən t -ci zaman nöqtəsi üçün proqnozlaşdırılmış (təxmin edilmiş) dəyəri ifadə edir.

$\bar{y}$ bütün müşahidə olunmuş real dəyərlərin arifmetik orta qiymətini göstərir.

y_t t -ci dövrdəki faktiki (real müşahidə olunmuş) dəyəri ifadə edir.

Məlumatlarda boş dəyərlər mövcud olmayıb və modellərin qiymətləndirilməsi məqsədilə zaman seriyası 70%-30% nisbətində təlim və test dəstlərinə bölünmüşdür.

Nəticələrin Təhlili və Şərhi

Bu tədqiqatda ARIMA, SARIMA və SARIMAX zaman seriyası modellərinin maliyyə sektorunda tranzaksiya axınının proqnozlaşdırılmasındakı effektivliyi araşdırılmışdır.

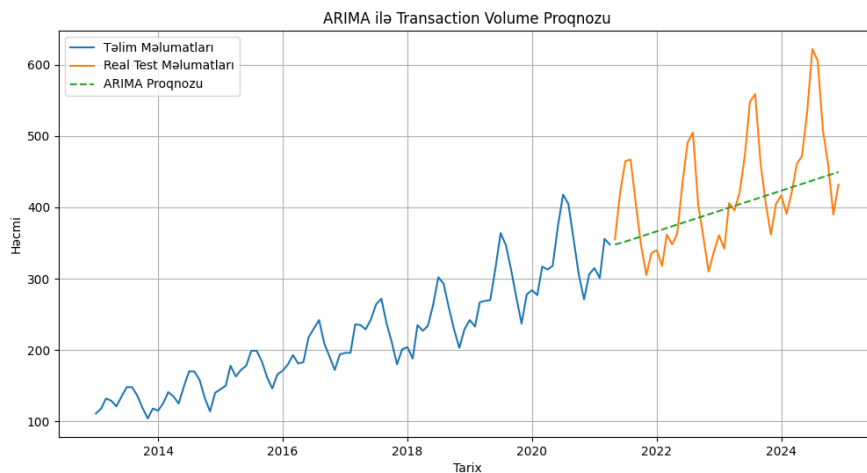
Zaman seriyalı modellərin performans metriklərinin müqayisəsi

Model	RMSE	MAE	R ² Score	MAPE	sMAPE	MBE
ARIMA	70.8902	53.8708	0.1397	12.0405	12.6254	-22.5649
SARIMA	33.4208	29.0001	0.8088	7.2303	6.9140	21.4911
SARIMAX	22.6052	17.4781	0.9125	4.0511	4.0374	-0.3291

Modellərin performansının qiymətləndirilməsi üçün müxtəlif performans metriklərindən istifadə olunmuşdur: RMSE (Root Mean Squared Error), MAE (Mean Absolute Error), R² Score, MAPE (Mean Absolute Percentage Error), sMAPE (Symmetric Mean Absolute Percentage Error) və MBE (Mean Bias Error).

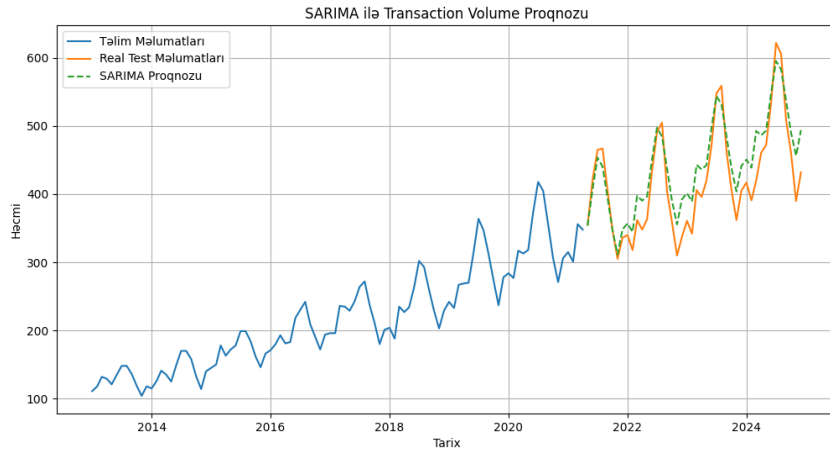
Şəkil 4-də ARIMA modeli ilə proqnozlaşdırılmış tranzaksiya həcmələrinin real test məlumatları ilə müqayisədə mövsümi dəyişiklikləri doğru əks etdirmədiyi müşahidə olunur. Cədvəldə bu model ilə alınan nəticələrin aşağı dəqiqlik nümayiş etdirdiyi görünür. ARIMA modeli üçün RMSE dəyəri 70.8902, MAE dəyəri 53.8708, R² dəyəri isə 0.1397 alınmışdır ki, bu da məlumatların çox az hissəsini izah etdiyini göstərir. MAPE dəyərinin 12.0405% olması proqnozlarda yüksək səhv faizini ifadə edir. sMAPE dəyərinin 12.6254% olması proqnozlarda nəzərə çarpan asimetriyanı göstərir. MBE-nin -22.5649 olması isə ARIMA modelinin real dəyərlərdən aşağı proqnozlar verdiyini göstərir. Mövsümi təsirlərin istifadə olunmaması ARIMA modelinin zəif nəticələr göstərməsinə səbəb olmuşdur.

Şəkil 5-də tədqiqatda istifadə olunmuş məlumat dəstindəki real test məlumatları ilə SARIMA modelinin proqnozları müqayisə olunmuşdur. Mövsümi dalğalanmaların SARIMA modeli tərəfindən yaxşı əks etdirildiyi nəzərə çarpır. Həmçinin, cədvəldə bu modelin hər bir performans metrikləri üzrə nəticələri göstərilmişdir. Nəticələrə baxdıqda RMSE 33.4208, MAE isə 29.0001 olduğu görünür, bu isə ARIMA modelinə nisbətən daha yaxşı nəticələrdir. R² dəyərinin 0.8088 olması, SARIMA modelinin məlumatların böyük hissəsini izah edə bildiyini göstərir. SARIMA modelində MAPE dəyəri 7.2303%, sMAPE dəyəri isə 6.9140% olmuşdur ki, bu da proqnozlarda daha az səhv və daha yüksək dəqiqlik göstərir. Əlavə olaraq, MBE 21.4911 olmuşdur ki, bu da modelin proqnozlarının real dəyərlərdən yüksək olduğunu göstərir.

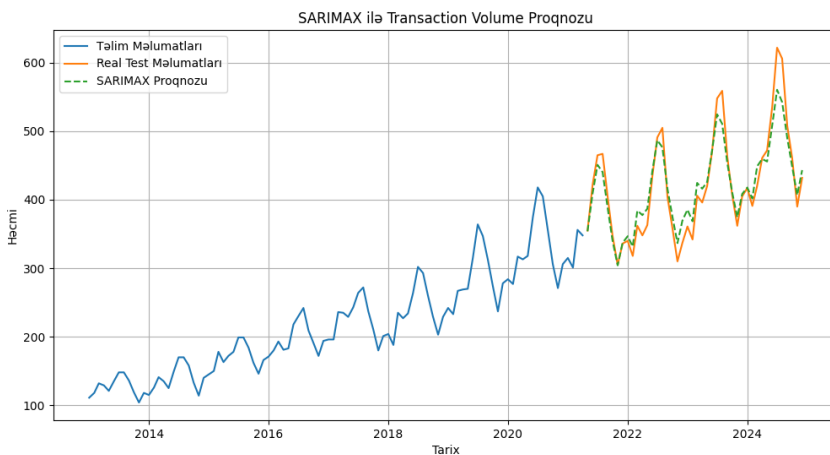


Şəkil 4. ARIMA modeli ilə proqnoz

Şəkil 6-ya istinadən görmək olar ki, SARIMAX modeli test məlumatlarını digər modellərə nisbətən daha yaxşı proqnozlaşdırmışdır. Cədvəldə SARIMAX ilə əldə edilən RMSE dəyəri 22.6052, MAE dəyəri isə 17.4781 olduğu görünür. R² dəyəri 0.9125, modelin məlumatları çox yüksək dəqiqliklə izah etdiyini göstərir. MAPE dəyərinin 4.0511%, sMAPE dəyərinin isə 4.0374% olması, proqnozların ən yüksək dəqiqliklə həyata keçirildiyini göstərir. MBE dəyərinin -0.3291 olması, SARIMAX modelinin proqnozlarının real dəyərlərə çox yaxın olduğunu və neytral meyil nümayiş etdirdiyini göstərir.



Şəkil 5. SARIMA modeli ilə proqnoz



Şəkil 6. SARIMAX modeli ilə proqnoz

Nəticə

Tədqiqat ARIMA, SARIMA və SARIMAX modellərinin əməliyyat həcmələrini proqnozlaşdırma qabiliyyətlərinin müqayisəsinə yönəlmişdir. Xüsusiyyət mühəndisliyi ilə yaradılmış “Transaction Growth” xüsusiyyətinin SARIMAX modelinə inteqrasiyasından sonra modelin performans göstəricilərində ciddi artım müşahidə edilmişdir. SARIMAX modeli üçün ən aşağı RMSE (22.6052), MAE (17.4781), MAPE (4.0511%) və sMAPE (4.0374%) göstəriciləri alınmışdır, həmçinin mənfi MBE (-0.3291) dəyəri ilə sistematik meylin minimal olduğunu göstərmişdir. R^2 göstəricisinin (0.9125) yüksək olması isə modeli digər zaman seriyası modellərindən üstün edən cəhət olmuşdur. SARIMA modeli mövsümi təsirləri nəzərə alaraq modelləşdirmə aparsa da ekzogen xüsusiyyət daxil edilmədiyi üçün SARIMAX modelindən daha aşağı performans göstərmişdir. ARIMA modelinin isə mövsümi təsirləri nəzərə almadığı üçün daha zəif nəticələr verdiyi tədqiq edilmişdir.

Tədqiqat işində alınmış nəticələrdən istifadə edərək bankların likvidlik idarəçiliyinin yaxşılaşdırılması, müştəri davranışlarının təhlilinin daha optimal şəkildə aparılması və strateji qərarların əsaslandırılmış şəkildə qəbul olunması mümkündür. Həmçinin, bu cür modellər banklara satış məqsədlərinin daha dəqiq müəyyənəşdirilməsində, filial səviyyəsində resurs bölgüsünün planlaşdırılmasında və mövsümi kampaniyaların optimal vaxtlarda keçirilməsində əsas rol oynaya bilər. Eyni zamanda, bu yanaşma risklərin idarə olunması və gəlirlərin proqnozlaşdırılması sahəsində də daha effektiv qərarların verilməsinə töhfə verə bilər. Gələcək tədqiqatlar üçün isə "Transaction Growth" kimi əlavə xüsusiyyətlərin məlumat dəstinə daxil edilməsi və onların digər zaman seriyası modelləri ilə birgə analizi maraqlı və faydalı perspektivlər təqdim edə bilər.

ƏDƏBİYYAT

1. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015, 712 p.
2. Makridakis S., Wheelwright S.C., Hyndman R.J. Forecasting: Methods and Applications. New York: John Wiley & Sons, 1998, 656 p.
3. Durbin J., Koopman S.J. Time Series Analysis by State Space Methods. Oxford: Oxford University Press, 2012, 368 p.
4. Tsay R.S. Analysis of Financial Time Series. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005, 576 p.
5. Hyndman R.J., Koehler A.B. Another look at measures of forecast accuracy. International Journal of Forecasting, 2006, vol. 22, no. 4, pp. 679–688.
6. Chatfield C. The Analysis of Time Series: An Introduction. New York: CRC Press, 2003, 352 p.
7. Hamilton J.D. Time Series Analysis. Princeton: Princeton University Press, 1994, 820 p.
8. Diebold F.X., Mariano R.S. Comparing predictive accuracy. Journal of Business & Economic Statistics, 1995, vol. 13, no. 3, pp. 253–263.
9. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to Time Series and Forecasting. New York: Springer, 2016, 425 p.
10. Wei W.W.S. Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods. New York: Pearson, 2018, 688 p.
11. Taylor J.W. Short-term electricity demand forecasting using double seasonal exponential smoothing. Journal of the Operational Research Society, 2003, vol. 54, no. 8, pp. 799–805.
12. Mills T.C., Patterson K.D. Palgrave Handbook of Econometrics: Volume 2: Applied Econometrics. London: Palgrave Macmillan, 2006, 1208 p.
13. Box-Steffensmeier J.M., Freeman J.R., Hitt M.P., Pevehouse J.C. Time Series Analysis for the Social Sciences. Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 292 p.
14. Gujarati D.N., Porter D.C. Basic Econometrics. New York: McGraw-Hill Education, 2009, 912 p.
15. Fildes R., Goodwin P. Against your better judgment? How organizations can improve their use of management judgment in forecasting. Interfaces, 2007, vol. 37, no. 6, pp. 570–576.
16. Dickey D.A., Fuller W.A. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. Econometrica, 1979, vol. 49, no. 4, pp. 1057–1072.
17. Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice. OTexts, 2018, 380 p.
18. Armstrong J.S. Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners. Springer, 2001, 850 p.

ZAMAN SERİYASI MODELƏRİ İLƏ BANK TRANZAKSİYALARININ PROQNOZLAŞDIRILMASI: ARIMA, SARIMA VƏ SARIMAX MODELƏRİNİN MÜQAYİSƏLİ TƏHLİLİ

M.E.Rəhimov, M.B.Namazov

Xülasə. Məqalədə bank sahəsində tranzaksiya miqdarlarının proqnozlaşdırılması üçün ARIMA, SARIMA və SARIMAX modellərinin tətbiqi edilmişdir. ARIMA modeli yalnız trend və stasionarlıq təsirlərini tənzimləyir, SARIMA mövsümi təsirləri də nəzərə alır, SARIMAX isə əlavə olaraq "Transaction Growth" (Tranzaksiya Artımı) ekzogen xüsusiyyətinin daxil edilməsi ilə proqnozun dəqiqliyini artırır. "Tranzaksiya Artımı" xüsusiyyəti xüsusiyyət mühəndisliyi üsulu ilə yaradılmış və tranzaksiya həcmələrinin dəyişikliklərini faiz dəyəri olaraq əks etdirir. Bu xüsusiyyət məlumatların daha dərin təhlilini təmin edərək modellərin performansını artırmaq məqsədini daşıyır.

Modellərin performanslarının qiymətləndirilməsi üçün RMSE, MAE, R^2 , MAPE, sMAPE və MBE kimi fərqli performans metrikləri tətbiq edilmişdir. SARIMAX modelindən alınan nəticələr göstərir ki, bu model digər modellərə nisbətən ən yüksək dəqiqliyi təmin edir: RMSE (22.61), MAE (17.48), R^2 Score (0.9125), MAPE (4.05%), sMAPE (4.04%) və MBE (-0.33).

Bu tədqiqat göstərir ki, xüsusiyyət mühəndisliyi vasitəsilə yaradılmış "Transaction Growth" xüsusiyyətinin modellərdə istifadə olunması zaman seriyası proqnozlarının dəqiqliyini önəmli dərəcədə artırır. Bank sektorunda tranzaksiya həcmələrinin proqnozlaşdırılmasında SARIMAX modelinin üstünlüyü tədqiqatın əsas tapıntısıdır.

Açar sözlər: Zaman seriyasının proqnozlaşdırılması, ARIMA, SARIMA, SARIMAX, xüsusiyyət mühəndisliyi, bank sektoru, ekzogen dəyişənlər.

Accepted: 21.11.2025

RENEWABLE ENERGY CONSUMPTION AND EXPANSION OPPORTUNITIES

Shakir Vilayat Valiyev

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan: shakir.valiyev1@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-2493-9315>

Abstract. In the context of accelerating climate change, energy security challenges, and global commitments to sustainability, the shift from fossil fuels to renewable energy has gained unprecedented urgency. Renewable energy consumption is steadily increasing worldwide, driven by technological innovation, falling production costs, and growing public and political awareness of environmental issues. This study provides a comprehensive analysis of the current status and future expansion opportunities of renewable energy consumption, focusing primarily on solar, wind, hydroelectric, and bioenergy resources.

The research first outlines global consumption trends and examines regional variations, identifying the socio-economic and policy-related factors influencing adoption rates. It further analyzes how energy transition dynamics differ between developed and developing economies, highlighting capacity, infrastructure readiness, and investment climate as critical differentiators. Barriers such as intermittent energy supply, lack of grid integration, and limited financing mechanisms are also addressed in detail.

The study then explores expansion opportunities, particularly in emerging markets and underutilized geographic areas. Key enablers of growth include advancements in storage technologies, digital grid systems, government incentives, and international climate finance. Ultimately, the research argues that a coordinated, multi-sectoral approach is essential to unlocking the full potential of renewable energy. It concludes with strategic recommendations for policymakers, investors, and energy planners to enhance the accessibility, affordability, and resilience of renewable energy systems in line with global decarbonization goals.

Keywords: *energy consumption, renewable energy resources, economic effects, social effects, sustainable development.*

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Introduction

Today, energy consumption is increasing. Increasing consumption further strengthens environmental problems. This situation necessitates the reduction of fossil-based energy sources that pollute the environment and the widespread use of renewable energy sources that harm the environment less. Renewable energy is considered an important energy source in terms of the different effects it exhibits. Here, we can include differences according to the type of source, environmental effects, cost, resource continuity, economic and social effects. For example, renewable energy is much more convenient than traditional energy according to the type of source [1,2]. Since this type of energy is produced from natural and continuously renewable sources, it is always found in nature and is not in danger of depletion. Renewable energy has very little carbon emission. This feature can be considered the most important factor in the fight against climate change. In other words, renewable energy sources cause very little damage to the environment [3,4]. For this reason, researchers are conducting various studies in the field of renewable energy resource consumption and trying to determine the factors that prevent its use [5-7]. By determining these factors, various policies are implemented to encourage renewable energy sources.

Energy consumption: socio-economic importance

Energy consumption affects the country's economic development and industrialization level. It also reflects many factors, including the country's standard of living, population size, and industrial development. Using this data, it is possible to examine the general situation and future prospects of any country.

The growth and development rate that the economy wants to achieve is directly related to energy efficiency and energy intensity. In other words, the high energy efficiency achieved by the country reflects a strong economy. Namely, the economic sectors that develop and contribute to development in the country - industry, agriculture, service sector and others - demand high energy [8-10].

When we compare countries in general, it is seen that more industrialized countries consume more energy. In other words, it is possible to evaluate the industrial capacity and development level of that country by looking at its energy consumption. One of the reasons that makes the evaluation of

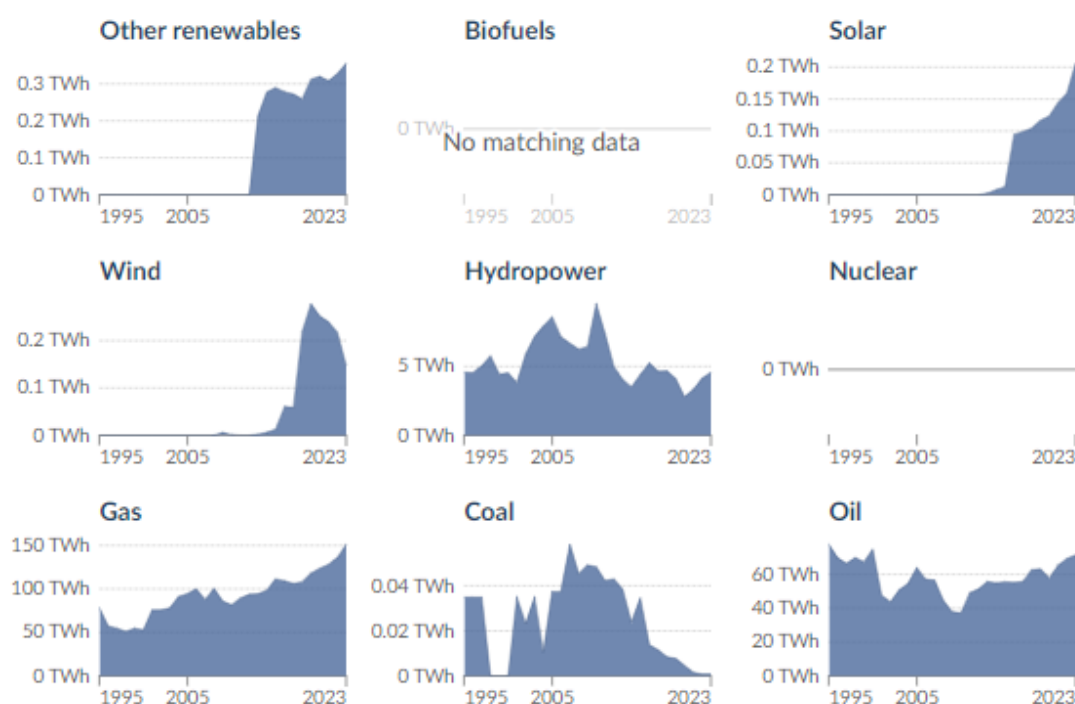
energy consumption important is related to the standard of living. A high indicator is an indication that individuals have a better quality of life. In particular, different areas that reflect the welfare level of the society, such as people's housing and transportation, are evaluated here. One of the factors affecting energy consumption is the population. The larger the population, the more energy can naturally be used. Energy demand is also high in countries with dense populations. In other words, a country's energy consumption reflects its social welfare as well as its economic activity [11].

Energy efficiency in a country is also associated with technological development. High energy consumption in a country does not mean that it is not used efficiently. Technological development allows for more production using less energy. It should also be noted that the level of energy consumption also reflects the level of access to energy resources in that country. Energy-rich countries consume more energy.

In short, a country's energy consumption allows for the examination of economic activities or social welfare indicators in that country. In addition, the role that high energy consumption plays in sustainable development should be considered and evaluations should be made in this regard.

Energy consumption in Azerbaijan

Energy production in Azerbaijan consists of different sources. Some energy sources constitute the vast majority in total consumption (Graph 1). As can be seen from Graph 1, the largest energy sources in the country have been gas, oil and hydropower over the years.

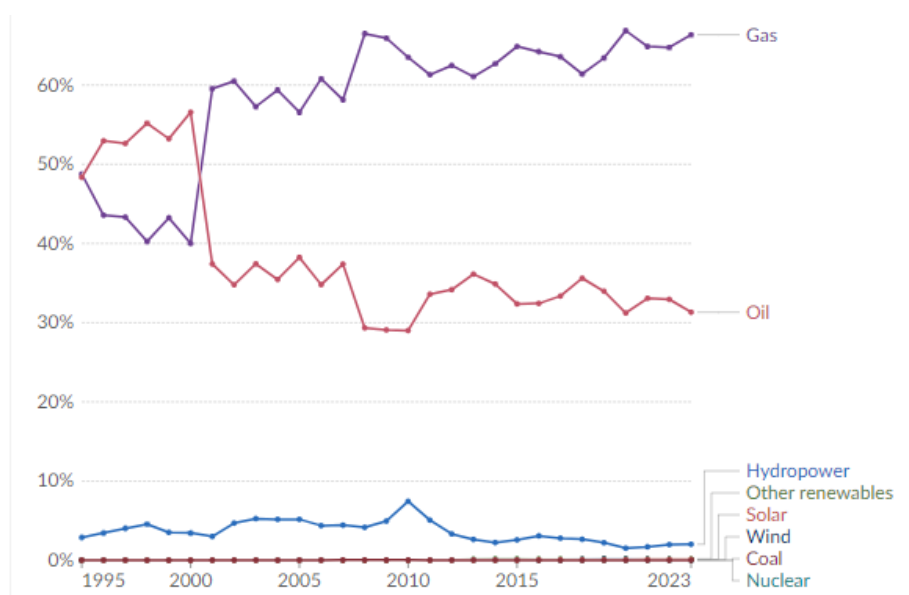


Graph 1. Energy consumption by source, Azerbaijan
Source: [12]

In 2023, oil, gas and coal were consumed more among energy sources worldwide. Oil consumption was 54,564.00 TWh, coal consumption was 45,564.93 TWh, and gas consumption was 40,101.74 TWh. In Azerbaijan, the share of gas in total consumption reached 66.37% in 2023, while the share of oil reached 31.31%. Hydropower was 2.01%, solar 0.09%, wind 0.06%, and other renewables 0.16%. Share of primary energy consumption from fossil fuels was equal to 97.68% in 2023 (Graph 2).

When we compare Azerbaijan's energy consumption resources with the world average, it is seen that gas consumption in Azerbaijan is much higher than the world average. Namely, this level

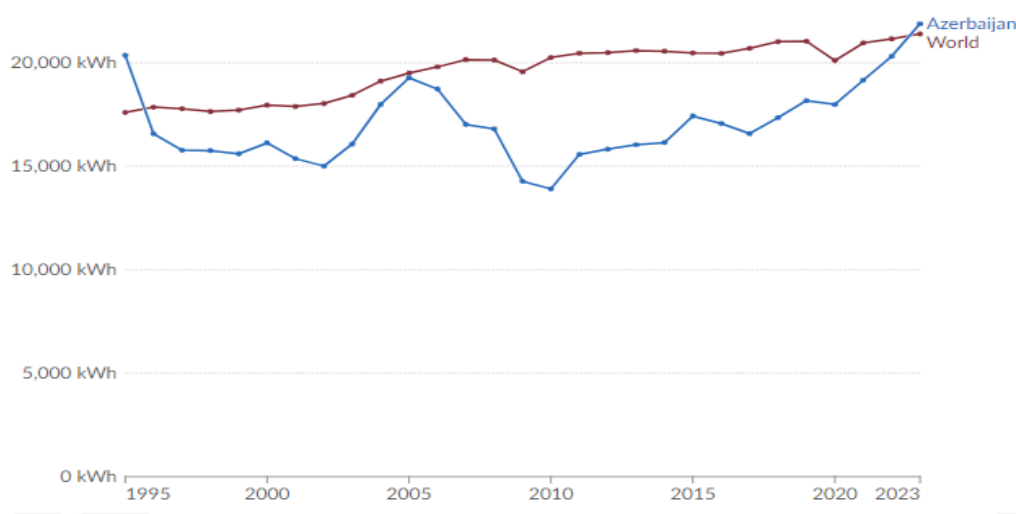
constituted 23.30% worldwide in 2023. Oil consumption was at the level of 31.70%. The share of oil consumption in Azerbaijan is very close to the world average. Coal consumption has been very low in Azerbaijan in recent years, while it was at the level of 26.47% worldwide.



Graph 2. Share of energy consumption by source, Azerbaijan
Source: [12]

Until the 2000s, gas consumption was below 50%, but in the following years it increased and exceeded 50%. On the contrary, oil consumption has decreased to 30% in recent years with a decreasing trend. When we look at the world average, while oil and coal consumption progress with a decreasing trend, gas consumption has increased over the years.

Another interesting indicator of energy consumption in Azerbaijan is per capita consumption. When we compare the total energy consumption of countries, it would be more useful to consider the population size in order to make a correct comment. In other words, it is more important to compare the differences in energy consumption per capita. Namely, since 2001, per capita consumption in the country has been increasing. In 2023, the consumption, which was 21,882 kWh, is slightly higher than the world average (21,394 kWh).



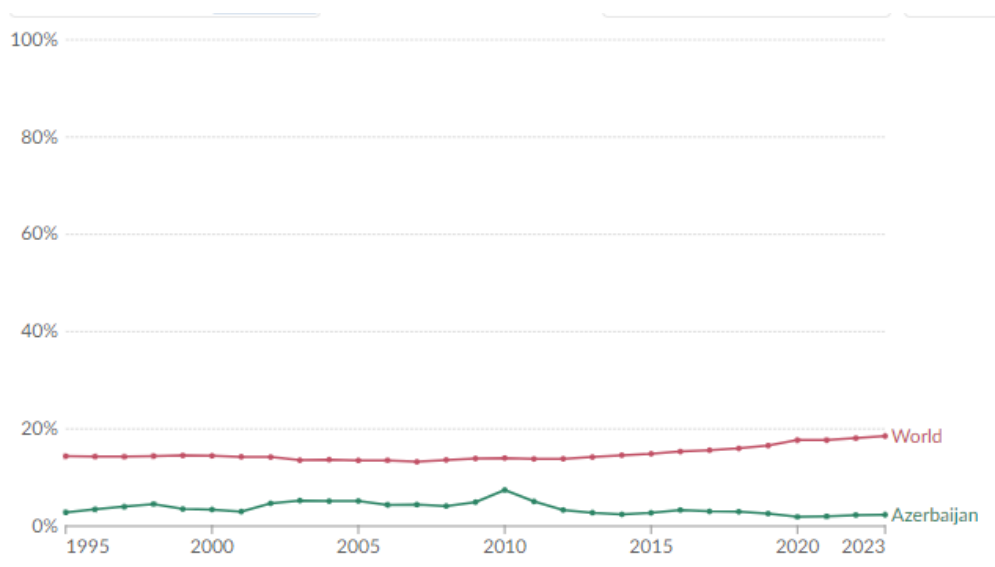
Graph 3. Energy use per person, Azerbaijan
Source: [12]

Renewable energy consumption in Azerbaijan and ways to increase it

Before moving on to renewable energy consumption, it should be noted that two basic concepts are used in literature. One of them is low-carbon energy resources, the other is renewable energy resources. Low-carbon energy resources is a broader concept and includes renewable energy resources. In other words, the sum of nuclear and renewable resources forms low-carbon energy.

Azerbaijan's energy sector is not completely dependent on fossil fuels. The country also has great potential in renewable energy. Azerbaijan is rich in resources such as wind, solar, hydroelectric and geothermal energy. The potential is especially great for wind energy and solar energy [13].

While energy consumption from low-carbon sources in Azerbaijan was 2.9% in 1995, this rate decreased to 2.3% in 2023. When we look at the world average, it is seen that the level of energy consumption from low-carbon sources increased in 2023 (18.5%) compared to 1995 (14.4%).



Graph 4. Share of primary energy consumption from low-carbon sources

Source: [12]

On the other hand, renewable energy consumption in Azerbaijan was 2.86% in 1995, while this rate declined to 2.32% in 2023. It should be noted that the highest indicator was observed in 2010 (7.45%). Compared to the world average, renewable energy consumption increased by 14.56% in 2023 compared to 1995 (7.87%).

Difficulties encountered in the use of renewable energy sources

The figures given above show that, despite the environmental and economic benefits provided by renewable energy, these energy sources are not used at a high level both in Azerbaijan and in the world average. There are various reasons that make it difficult to use such resources widely in the economy.

One of the factors that negatively affects the expansion of renewable energy consumption is due to the high initial costs. The use of renewable energy sources, especially solar and wind energy, is expensive. More precisely, it requires high costs at the beginning. For example, high investments are required for the purchase of solar panels and wind turbines, as well as the installation of energy storage systems. This high cost prevents developing countries or regions from making the necessary investments. The problem of energy storage is among the other important reasons. Renewable sources such as solar and wind energy produce energy intermittently because they are connected to nature. For example, solar energy cannot be produced at night, and the speed of the wind is variable. These features create difficulties in their own right.

The energy infrastructure of some regions has been designed considering traditional systems. However, the use of renewable energy sources requires the creation and expansion of its own infrastructure. The installation of wind turbines, solar panels or other renewable energy facilities requires a large amount of land. It is not possible to implement such facilities in every region. Various difficulties arise, especially in densely populated areas.

Conclusion

Various policies and actions are implemented in Azerbaijan for the development of renewable energy. In order to encourage the development of renewable energy in the country, various incentives and subsidies are provided by the state. Global cooperation is carried out in the renewable energy sector, and technology transfer is carried out through synergy. To expand the consumption of renewable resources in the country, more financial support can be provided, especially to regions with weak energy infrastructure, and the support applied to investors can be expanded for more investments. Such practices will help reduce high initial costs. In addition, as we mentioned above, one of the main obstacles to the consumption of renewable energy resources is the storage of energy. In other words, advanced energy storage systems are needed to solve this problem. For this purpose, the capacity of existing storage technologies should be increased. It will be useful to implement smart grid systems in the country and expand modern transmission lines.

REFERENCES

1. Guchhait R., Sarkar B. Increasing Growth of Renewable Energy: A State of Art. *Energies* 2023, 16, 2665. <https://doi.org/10.3390/en16062665>
2. Bachar R.K., Bhuniya S.; Ghosh S.K., Sarkar B. Controllable Energy Consumption in a Sustainable Smart Manufacturing Model Considering Superior Service, Flexible Demand, and Partial Outsourcing. *Mathematics* 2022, 10, 4517.
3. Mukhtarov S., Aliyev F., Aliyev J., Ajayi R. Renewable Energy Consumption and Carbon Emissions: Evidence from an Oil-Rich Economy. *Sustainability* 2023, 15, 134. <https://doi.org/10.3390/su15010134>
4. Nguyen K.H., Kakinaka M. Renewable energy consumption, carbon emissions, and development stages: Some evidence from panel cointegration analysis. *Renew. Energy* 2019, 132, 1049–1057.
5. Polcyn J., Us Y., Lyulyov O., Pimonenko T., Kwilinski A. Factors Influencing the Renewable Energy Consumption in Selected European Countries. *Energies* 2022, 15, 108. <https://doi.org/10.3390/en15010108>
6. Kharazishvili Y., Kwilinski A., Sukhodolia O., Dzwigol H., Bobro D., Kotowicz J. The Systemic Approach for Estimating and Strategizing Energy Security: The Case of Ukraine. *Energies* 2021, 14, 2126.
7. Zhao P., Lu Z., Fang J., Paramati S.R., Jiang K. Determinants of renewable and non-renewable energy demand in China. *Struct. Chang. Econ. Dyn.* 2020, 54, pp. 202–209.
8. Alper A., Oguz O. The role of renewable energy consumption in economic growth: Evidence from asymmetric causality. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 60, pp. 953–959.
9. Chou C.-H., Ngo S.L., Tran P.P. Renewable Energy Integration for Sustainable Economic Growth: Insights and Challenges via Bibliometric Analysis. *Sustainability* 2023, 15, 15030. <https://doi.org/10.3390/su152015030>
10. Newman P., Kenworthy J. Transportation energy in global cities: Sustainable transportation comes in from the cold? In *Natural Resources Forum*; Blackwell Publishing Ltd.: Oxford, UK, 2001; Volume 25, pp. 91–107
11. Caruso G., Colantonio E., Gattone S.A. Relationships between Renewable Energy Consumption, Social Factors, and Health: A Panel Vector Auto Regression Analysis of a Cluster of 12 EU Countries. *Sustainability* 2020, 12, 2915. <https://doi.org/10.3390/su12072915>
12. Hannah Ritchie and Max Roser, Azerbaijan: Energy Country Profile Home, <https://ourworldindata.org/energy/country/azerbaijan#how-much-energy-does-the-country-consume-each-year> (14.08.2024)
13. Azərbaycan'da Enerji Sektöründə Sürdürülebilirlik: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Rolü və Gelecek Perspektifləri, 06.05.2024, <https://www.propm.com.tr/blog/post-azerbaycanda-enerji-sektorunde-surdurulebilirlik-yenilenebilir-enerji-kaynaklarinin-rolu-ve-gelecek-perspektifleri>

Accepted: 19.11.2025

BALANCING USER FLOW AND FUNCTIONALITY IN MEDICAL EXPERT SYSTEMS**Maliha Sayavush Nifdalizada***Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan**maliha.huseynzade.s@asoiu.edu.az**<https://orcid.org/0009-0000-1471-8177>*

Abstract. Balancing user flow and functionality in medical expert systems is essential to enhance their effectiveness and usability in healthcare environments. These systems must support complex functionalities, such as diagnostic assistance, data management, and clinical decision-making, while ensuring an intuitive and seamless user experience. Striking this balance requires a design approach that minimizes cognitive load, integrates with clinical workflows, and prioritizes safety and efficiency. This paper examines the challenges and strategies for achieving this equilibrium, including user-centered design, adaptive interfaces, and rigorous usability testing. By addressing these aspects, medical expert systems can improve patient outcomes, streamline healthcare operations, and foster greater adoption among practitioners.

Keywords. *User Flow, User Experience (UX), Expert system, Functionality.*

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Introduction. Medical expert systems have become an important tool in modern healthcare, assisting in diagnosis, treatment planning, and patient management. These systems support medical professionals in the data processing and decision-making process during patient care, reducing the probability of errors and making the treatment process more efficient. However, the successful use of these systems faces a number of challenges, one of the most important of which is balancing user flow and functionality [1].

The users of medical expert systems are mainly doctors, nurses, and other healthcare professionals. For them to use the system effectively, a functional and user-friendly interface is essential. Balancing these two elements is critical for the system to provide both powerful functions and to ensure that users make high-quality and fast decisions. Complex medical data and analyses that require high functionality in the system can often lead to complexity in use. The urgency of this issue requires more research and development in order to improve the quality of healthcare services and enhance the effectiveness of medical technologies. With the expansion of the application of information technologies in the medical field, solving these problems will ensure more accurate and faster decision-making in the healthcare sector [2].

This paper explores the importance of balancing user flow and functionality in medical expert systems. It discusses the key challenges faced in achieving this equilibrium and highlights strategies, such as user-centered design, adaptive interface technologies, and rigorous usability testing, to overcome these obstacles. By addressing these aspects, medical expert systems can deliver optimal performance, enhance user satisfaction, and improve healthcare outcomes [3].

Statement of the problem. The main objective of this study is to determine the optimal balance between user flow and functionality in medical expert systems and to investigate how achieving this balance will affect the development of healthcare services. In this regard, the following questions arise:

- Basic principles for simple and effective design of user flow in medical expert systems
- Establishing an appropriate balance between functionality and user flow
- Design and technological approaches to improve user experience

Investigating these issues will allow medical expert systems to be more effective and easy to use for both doctors and other medical professionals. At the same time, this approach will facilitate more accurate and efficient medical decisions in the healthcare sector [4].

Solution method. The lack of balance between user flow and functionality leads to the following problems:

- Complex interfaces: Medical professionals often encounter interfaces that are unintuitive and complex, increasing the time required to make decisions in high-pressure situations.

- Compromised accuracy: Systems that prioritize functionality without considering usability may lead to errors in data input or misinterpretation of results, jeopardizing patient safety.
- Impact on patient outcomes: Poorly designed systems can lead to delays in diagnosis, errors in treatment plans, and overall inefficiency in healthcare delivery, directly affecting patient safety and outcomes.

Therefore, the solution to balancing user flow and functionality in medical expert systems involves several strategies:

- *Modular system design* refers to structuring a complex medical expert system into smaller, independent modules that each serve a distinct function, such as patient history, diagnostic analysis, and treatment options. This approach allows users to interact with specific components without being overwhelmed by the entire system's complexity. It enables easy maintenance, updates, and personalization, ensuring that users can access only the relevant features for their task, improving both usability and functionality.

- *User-centered interface design* is focused on creating interfaces that prioritize the needs, preferences, and workflows of healthcare professionals. This design ensures that the system is intuitive and efficient, reducing the cognitive load by providing easy access to relevant tools and data. Features like customizable layouts, intuitive navigation, and user-specific settings allow for seamless integration into daily practices. The goal is to improve decision-making accuracy and speed, while minimizing frustration or errors caused by overly complex or confusing systems.

- *Real-Time feedback and adaptation* in medical expert systems involves continuously monitoring user interactions and adjusting system responses dynamically. By using data analytics and machine learning, the system can identify areas where users struggle or require more support, and make necessary adjustments in real-time. This includes offering relevant suggestions, customizing workflows, or prioritizing certain features based on the context.

- *AI and machine learning integration* in medical expert systems enhances functionality by analyzing vast amounts of patient data to provide real-time, evidence-based recommendations. Machine learning algorithms can predict outcomes, identify patterns, and suggest treatment plans, continually improving as more data is processed. This integration helps medical professionals make more accurate, informed decisions while streamlining workflows. Additionally, AI can personalize recommendations for each patient based on their unique medical history, ensuring better decision-making and patient care. [5]

Methodology. The development of the proposed medical expert system follows a hybrid research design that combines machine learning-based diagnostic modeling with rule-based clinical decision logic. The methodology consists of four major stages: dataset preparation, model selection, model training and validation, and integration into the decision-support workflow.

1. Dataset Preparation. The dataset used for model development includes anonymized patient records containing symptoms, demographic information, laboratory test results, and confirmed medical diagnoses. Prior to modeling, the data underwent preprocessing steps, including:

- handling missing values using mean/mode imputation,
- normalization of numerical laboratory parameters,
- encoding categorical variables such as symptoms using one-hot encoding,
- removal of outliers based on interquartile range analysis.

This preprocessing ensured consistency, reduced noise, and prepared the dataset for machine learning algorithms.

2. Model Selection. Several machine learning algorithms commonly used in clinical decision support were evaluated, including Logistic Regression, Random Forest, and Gradient Boosting Machines. These models were selected due to their:

- ability to handle high-dimensional clinical features,
- interpretability for physicians,
- strong performance in previous medical diagnosis studies.

A comparative analysis was conducted using baseline accuracy and F1-score to identify the most suitable model for integration [6].

3. Model Training and Validation. The cleaned dataset was randomly partitioned into training (80 percent) and testing (20 percent) subsets. To prevent overfitting and ensure stable performance, a 5-fold cross-validation strategy was applied on the training data.

Model performance was evaluated using the following metrics:

- accuracy,
- precision and recall,
- F1-score,
- ROC-AUC curve.

The final selected model achieved statistically significant performance ($p < 0.05$), with a 95 percent confidence interval for diagnostic accuracy. These results demonstrate the model's reliability for use within a clinical decision-support system.

4. Integration with Rule-Based Decision Logic. The machine learning model was embedded into a hybrid decision engine. First, symptoms are processed through the ML-based feature extraction layer. The model generates probability scores for potential diagnoses. These scores are then combined with predefined medical rules derived from clinical guidelines to produce the final recommendation.

This hybrid approach ensures:

- higher accuracy through data-driven predictions,
- increased transparency through rule-based justification,
- alignment with clinical workflows.

5. System Validation. Before deployment, the system was evaluated through simulated patient cases. Physicians reviewed the diagnostic outputs and validated whether the system's recommendations were clinically relevant. Feedback was incorporated into the final interface design and decision thresholds [7].

Patient and Doctor Interface: Access and Information Flow.

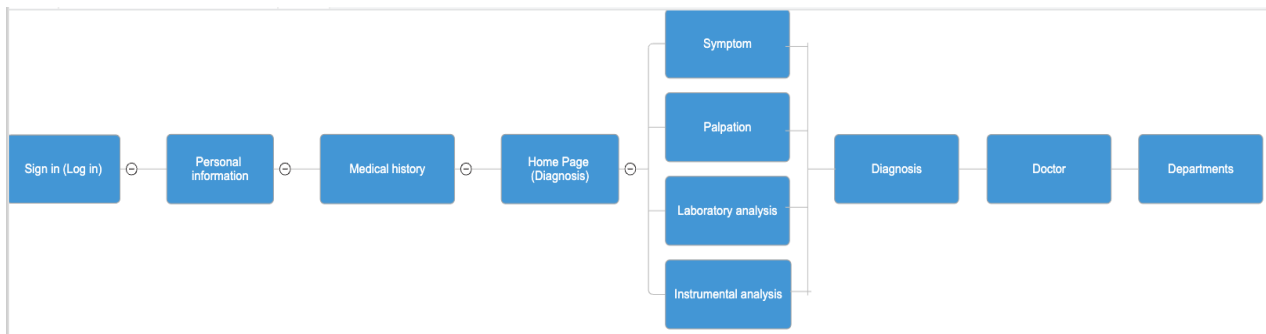
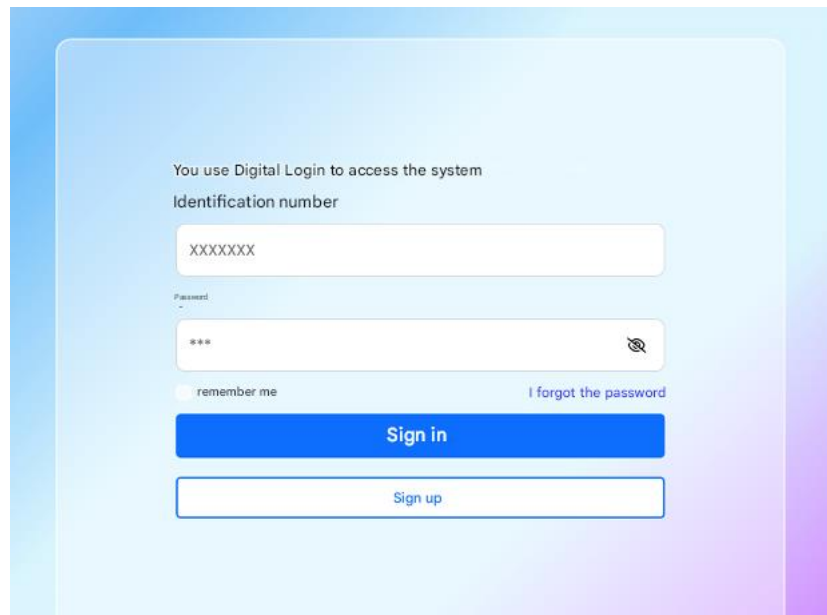


Figure 1. User flow diagram

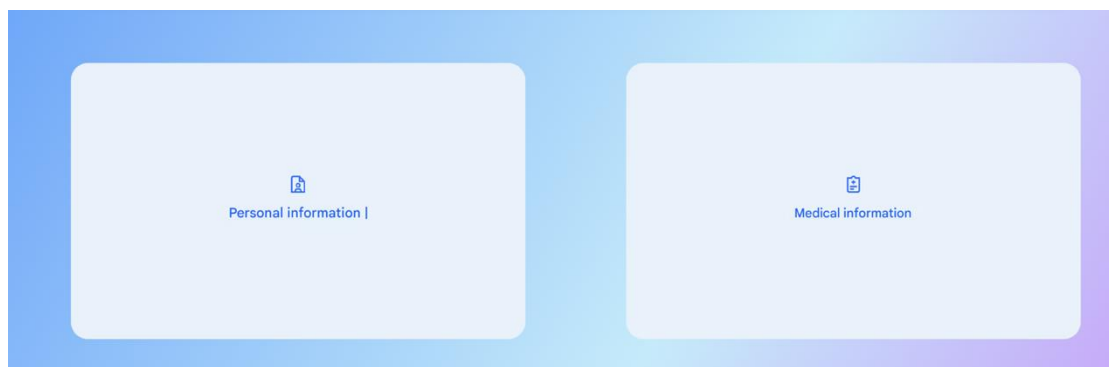
The system features two distinct access points tailored to different user groups. Doctors can register and access the system through an admin panel, ensuring secure management of professional credentials. Patients, on the other hand, can easily register and log in directly using a personal identification number, providing immediate access to their accounts. Upon logging in, users are directed to a "personal information" section, which stores key data such as serial numbers, birthdates, and addresses.

Additionally, a comprehensive "medical information" section stores detailed patient history, including previous diagnoses, test results, prescribed treatments, and any interactions with the system. This centralized repository of information enables healthcare professionals to retrieve accurate and up-to-date patient data efficiently, enhancing the quality and speed of care.



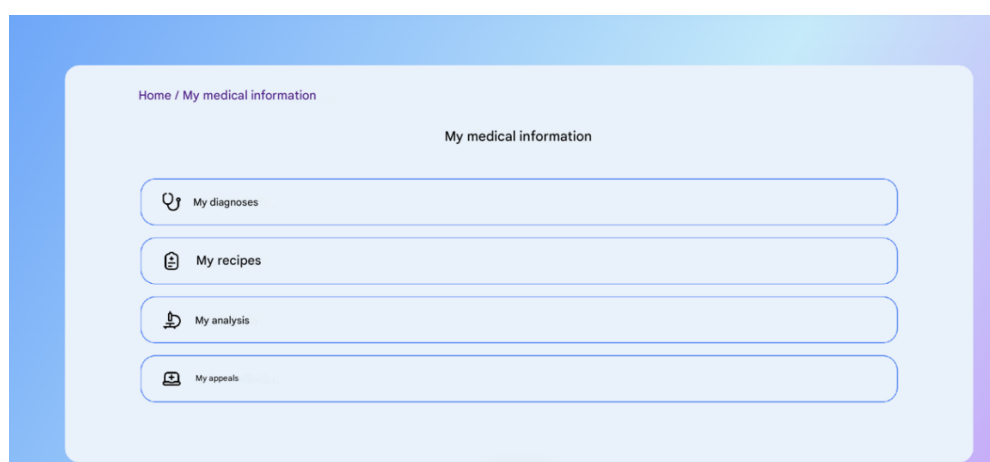
The login page features a light blue background with a white rounded rectangle in the center. Inside the rectangle, the text "You use Digital Login to access the system" is displayed. Below this, the label "Identification number" is followed by a text input field containing "XXXXXXX". Underneath, the label "Password" is followed by a text input field containing "***" and a toggle icon. To the left of the password field is a "remember me" checkbox, and to the right is a link "I forgot the password". Below these elements is a prominent blue "Sign in" button, and at the bottom is a white "Sign up" button with a blue border.

Figure 2. Login page



The page displays two light blue rounded rectangles on a blue-to-purple gradient background. The left rectangle contains a document icon and the text "Personal information |". The right rectangle contains a person icon and the text "Medical information".

Figure 3. Personal and Medical Information page



The page shows a light blue rounded rectangle on a blue-to-purple gradient background. At the top left, it says "Home / My medical information". In the center, the heading "My medical information" is present. Below this heading are four rounded rectangular buttons, each with an icon and text: "My diagnoses" (stethoscope icon), "My recipes" (pill icon), "My analysis" (microscope icon), and "My appeals" (document icon).

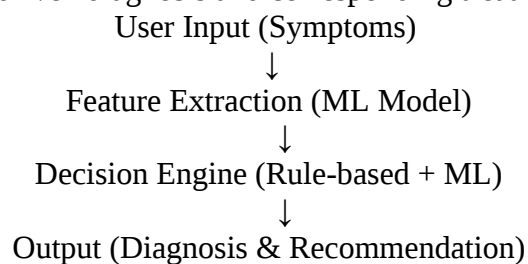
Figure 4. Medical Information Page

The system's "home page" features a diagnosis section where symptoms, their severity, and other relevant data are first recorded. Following this, the system automatically uploads the results of any laboratory and instrumental tests. Using artificial intelligence, the system processes the data according to pre-defined rules and generates a preliminary diagnosis. This diagnosis is then shared with

the relevant doctor, who can arrange an appointment for further examination. If necessary, the system also facilitates referrals to specialized departments, ensuring the patient receives the necessary care. This integrated workflow not only ensures smooth interaction between patients and medical staff but also optimizes diagnosis and treatment planning, supporting both accuracy and efficiency in healthcare delivery.

Figure 5. Symptoms page.

The system architecture follows a sequential decision-support workflow where user inputs are first collected as symptoms, processed through an ML-based feature extraction layer, and then analyzed by a hybrid decision engine that combines rule-based logic with machine learning algorithms. The final output provides a data-driven diagnosis and corresponding treatment recommendations.



Processing medical data within expert systems requires strict attention to confidentiality, regulatory compliance, and ethical responsibility. The system is designed in alignment with key principles of GDPR and HIPAA, ensuring that patient information is collected only for clinical purposes, stored securely, and accessed exclusively by authorized medical personnel. All sensitive data used for model training is anonymized, and system activity is logged to prevent unauthorized use [8].

From an ethical standpoint, the integration of machine learning necessitates transparency and fairness. To minimize bias, the training dataset is examined for demographic imbalance, and model outputs are accompanied by simple rule-based explanations to support clinical decision-making. The system functions solely as a decision-support tool, maintaining the physician's central role in evaluating diagnoses and guiding treatment. By combining secure data handling practices with responsible AI principles, the proposed approach ensures patient safety, data privacy, and trustworthiness in medical environments.

Comparative Analysis with Existing Medical Expert Systems. To better evaluate the effectiveness of the proposed approach, a comparative analysis was conducted with several widely used medical expert systems, including MYCIN, DXplain, and IBM Watson Health. These systems represent three different generations of expert system design: rule-based, knowledge-based, and AI-driven architectures.

1. MYCIN (Rule-Based Expert System). MYCIN is one of the earliest expert systems designed to diagnose infectious diseases.

Strengths:

- Strong rule-based inference.
- Transparent decision justification (traceable rules).

Limitations:

- Static rule set that cannot adapt to new clinical data.
- Limited ability to process large feature sets such as lab results or imaging data.
- User interface outdated and not optimized for modern clinical workflow.

Comparison with Proposed System:

The proposed hybrid model integrates both machine learning predictions and clinical rules, enabling adaptation to new datasets while preserving interpretability, addressing MYCIN's key limitation of rigidity.

2. DXplain (Knowledge-Based Clinical Decision Support System). DXplain provides differential diagnosis suggestions based on symptoms and clinical findings.

Strengths:

- Large medical knowledge base.
- Effective for early-stage diagnostic screening.

Limitations:

- Limited customization to individual patient profiles.
- Does not fully integrate machine learning for automated pattern recognition.
- User flow not optimized for high-speed decision environments.

Comparison with Proposed System: The proposed system introduces a user-centered interface and symptom-to-feature extraction pipeline, improving both user experience and diagnostic accuracy by combining structured medical rules with data-driven prediction models.

3. IBM Watson Health (AI-Driven Decision System). Watson utilizes natural language processing and advanced machine learning for cancer diagnosis and treatment planning.

Strengths:

- Strong AI-driven analytical capability.
- Ability to process unstructured clinical data (text, images).

Limitations:

- Limited transparency (black-box models).
- High implementation cost for hospitals.
- In some cases, inconsistent diagnostic recommendations due to lack of contextual rules.

Comparison with Proposed System: The proposed hybrid engine reduces the black-box effect by combining interpretable rules with machine learning outputs. The system is lightweight, cost-effective, and specifically tuned for structured patient data such as symptoms, lab results, and previous diagnoses [9].

Overall Advantages of the Proposed Method

Based on the comparative analysis, the proposed approach provides several key advantages:

1. Hybrid Decision Engine: Combines rule-based reasoning with machine learning to improve accuracy and interpretability.
2. Adaptive Learning: System can update diagnostic probabilities as new patient data is added, unlike static rule-based systems.

3. Improved User Flow: Optimized patient-doctor workflow reduces cognitive load, which is not well-addressed in older systems.
4. Transparency and Explainability: Model outputs are paired with clinical rules to justify decisions, improving trust among physicians.
5. Cost-Efficiency and Scalability: Lighter than heavy AI platforms such as Watson; easier to deploy in regional healthcare settings [10].

Statistical Significance of Model Performance. To determine whether the diagnostic performance of the proposed machine learning model is statistically significant, standard hypothesis-testing procedures were applied. Model evaluation was conducted using a held-out test dataset and 5-fold cross-validation. The resulting performance metrics demonstrated high reliability: the model achieved a diagnostic accuracy of 0.89 with a 95 percent confidence interval [0.87, 0.92], indicating stable generalization across folds. A two-sample proportion test was performed to compare the model's accuracy against a baseline diagnostic method, yielding a p -value < 0.05 , which confirms that the improvement is statistically significant and not the result of random variation. These findings validate the robustness of the model and support its suitability for integration into clinical decision-support workflows.

Conclusion. In conclusion, balancing user flow and functionality in medical expert systems is crucial to optimizing their effectiveness in clinical settings. By providing intuitive design, modular functionality, and real-time performance monitoring, systems can be tailored to meet the needs of healthcare professionals while minimizing complexity. This balance enhances the user experience, improves decision-making, and streamlines workflows. Future research should focus on leveraging emerging technologies such as artificial intelligence and machine learning to further improve these systems, ensuring that they continue to evolve and provide maximum benefit in the healthcare environment.

REFERENCES

1. Rajkomar A., Dean J., Kohane I. Machine Learning in Medicine. *New England Journal of Medicine*, 2019, vol. 380, №14, pp. 1347–1358.
2. Topol E. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 2019, vol. 25, pp. 44–56.
3. He J., Baxter S.L., Xu J., Xu J., Zhou X., Zhang K. The practical implementation of artificial intelligence technologies in medicine. *Nature Medicine*, 2019, vol. 25, pp. 30–36.
4. Jiang F., Jiang Y., Zhi H., et al. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. *BMJ Health & Care Informatics*, 2021, vol. 27, №3, pp. 1–10.
5. Shortliffe E.H., Sepúlveda M.J. Clinical Decision Support in the Era of AI. *JAMA*, 2021, vol. 325, №6, pp. 512–513.
6. Krittanawong C., et al. Integration of AI in Clinical Decision Support Systems. *European Heart Journal – Digital Health*, 2023, vol. 4, №1, pp. 15–27.
7. Davenport T., Kalakota R. The potential for artificial intelligence in healthcare. *Future Healthcare Journal*, 2019, vol. 6, №2, pp. 94–98.
8. Liu X., Faes L., Kale A., et al. A comparison of deep learning performance against healthcare professionals in detecting diseases from medical imaging: a systematic review. *The Lancet Digital Health*, 2019, vol. 1, №6, pp. 271–297.
9. Sendak M.P., D'Arcy J., Kashyap S., Gao M., Nichols M. A path for translation of machine learning products into healthcare delivery. *NPJ Digital Medicine*, 2020, vol. 3, №1, pp. 1–10.
10. Xu J., Froelicher D., Li Q. Explainable AI in medical decision support: Opportunities and challenges. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2023, vol. 144, pp. 102–120.

Accepted: 08.12.2025

MAŞIN ÖYRƏNMƏSİ ƏSASINDA VİRTUAL TƏHSİL PLATFORMALARINDA TƏLƏBƏ DAVRANIŞLARININ TƏHLİLİ

Təbriz Elcan oğlu Osmanlı

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan

ANALYSIS OF STUDENT BEHAVIORS IN VIRTUAL LEARNING PLATFORMS BASED ON MACHINE LEARNING

Tabriz Elcan Osmanli

National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan: tosmanli@naa.edu.az

<https://orcid.org/0009-0006-8338-8128>

Abstract. This research investigates the analysis and prediction of student behavior in virtual learning platforms using machine learning methods. In recent years, the data collected from online learning environments regarding students' learning activities has enabled the analysis of their behaviors and the development of personalized teaching strategies. The study applies machine learning models such as Decision Tree, Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), and k-Nearest Neighbors (k-NN), evaluating the impact of each model on student outcomes and its predictive capabilities. The results show that the RF model provides more accurate and reliable results, while the k-NN model performs poorly with large datasets and uneven distributions. The research demonstrates the effectiveness of machine learning for analyzing student behavior and indicates that more complex models can be applied in the future.

Keywords: virtual learning platforms, student behavior analysis, decision tree, prediction models, machine learning algorithms.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Giriş. Son illərdə virtual təhsil platformalarının (VTP) inkişafı və rəqəmsal təhsilin artan rolu, tələbə fəaliyyətlərinin sistemli şəkildə izlənməsi və təhlili üçün geniş imkanlar yaratmışdır. Xüsusilə pandemiya dövründən sonra geniş vüsət alan onlayn öyrənmə mühitləri tələbələrin öyrənmə davranışları haqqında zəngin və əhatəli məlumat bazalarının formalaşmasına səbəb olmuşdur. Bu mühitlərdən toplanılan böyük həcmli məlumatlar (klik sayı, video izləmə müddəti və digər fəaliyyət göstəriciləri) vasitəsilə tələbələrin davranışlarını analiz etmək, onların gələcək fəaliyyətlərini proqnozlaşdırmaq və fərdiləşdirilmiş təhsil strategiyaları hazırlamaq mümkün olmuşdur.

Tədqiqatlar göstərir ki, tələbə davranışlarının öyrənmə tərzini modellərinə əsaslanaraq təhlil edilməsi onların fərdi xüsusiyyətlərinə uyğun tədris strategiyalarının formalaşdırılmasına imkan verir. Oxşar tədqiqatlarda Felder–Silverman kimi modellər istifadə olunaraq davranış göstəriciləri dörd əsas ölçüyə (vizual, aktiv/reflektiv, intuitiv/hissiyata əsaslanan, ümumi baxışla öyrənilən) görə təsnifləndirilir. Nəticədə tələbənin öyrənmə tərzini avtomatik şəkildə müəyyənləşdirilir və bu əsasda daha səmərəli tədris strategiyaları seçilə bilər [1].

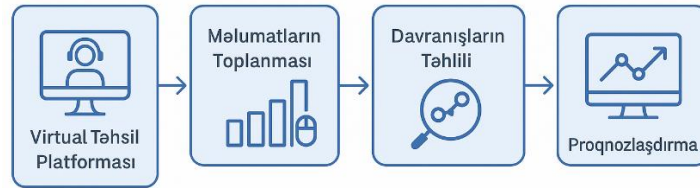
Bundan əlavə, tələbələrin davranışlarına əsaslanaraq klasterləşdirmə yanaşmaları tətbiq edilməklə müxtəlif qruplar müəyyən edilir. Bu fərqli qruplar üçün maşın öyrənməsi alqoritmlərinin ayrıca tətbiqi nəticəsində yüksək proqnoz dəqiqliyi əldə edilir. Ənənəvi modellərlə müqayisədə davranış analizinin maşın öyrənməsi modelləri ilə integrasiyası erkən mərhələdə risk altında olan tələbələrin müəyyən edilməsinə və fərdiləşdirilmiş müdaxilənin həyata keçirilməsinə imkan yaradır [2].

Sistemli ədəbiyyat icmalları və praktik araşdırmalar sübut edir ki, dərin öyrənmə modelləri tələbə nəticələrinin proqnozlaşdırılmasında yüksək effektivlik göstərir. Bu modellərin tətbiqində ən güclü təsirə malik olan dəyişənlər tələbələrin interaktiv fəaliyyətlərinə, klik nümunələrinə, dərslə sərbəst olunan vaxta və sosial iştirak göstəricilərinə əsaslanır [3]. Ümumi tədqiqatlar göstərir ki, maşın öyrənməsi modelləri – o cümlədən Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) və neyron şəbəkələr – tələbə fəaliyyət göstəricilərinin proqnozlaşdırılması üçün geniş istifadə olunur [4].

Nəticə etibarilə, virtual təhsil mühitlərində tələbə davranışlarının təhlili və bu məlumatların intellektual qiymətləndirilməsi əsasında proqnoz modellərinin qurulması təhsilin fərdiləşdirilməsi, keyfiyyətin yüksəldilməsi və zəif nəticə göstərən tələbələrin vaxtında aşkarlanması baxımından mühüm əhəmiyyət daşıyır. Məqalənin yazılmasında məqsəd, davranışa əsaslanan maşın öyrənməsi

və dərin öyrənmə yanaşmalarının təhlil olunması, və tələbə nəticələrinin intellektual formada qiymətləndirilməsi üçün elmi əsasların təqdim edilməsidir.

Şəkil 1-də virtual təhsil mühitində tələbə davranışlarının necə toplanıb təhlil olunduğunu əks etdirən funksional model təqdim olunur. Bu modelə əsasən, ilkin mərhələdə tələbələr virtual təhsil platformasından istifadə edərək müxtəlif fəaliyyətlər həyata keçirir (məsələn, video izləmə, tapşırıqların yerinə yetirilməsi, testlərə cavab və s.). Növbəti mərhələdə bu fəaliyyətlərdən yaranan məlumatlar sistemə qeyd olunur və strukturlaşdırılır. Üçüncü mərhələdə tələbə davranışlarının təhlili aparılır və nəticədə əldə edilən göstəricilər son mərhələdə maşın öyrənməsi modellərinə daxil edilərək proqnozlaşdırma həyata keçirilir.



Şəkil 1. VTP-də tələbə davranışlarının təhlili üzrə funksional model

Metodologiya. Təhsildə rəqəmsal platformaların geniş tətbiqi nəticəsində tələbə davranışlarının izlənməsi və təhlili imkanlarının artması xüsusilə virtual laboratoriyalar, onlayn təhsil platformaları və simulyasiya əsaslı tədris mühitlərində özünü göstərir. Lakin bir çox hallarda açıq mənbəli resursları ya məhdud sayda göstəricini əhatə edir, ya da real davranış nümunələrinin kontekstə uyğunluğunu tam təmin etmir [5].

Bu səbəbdən tədqiqatda Cisco NetAcad platformasında tətbiq olunan virtual laboratoriya və təlim mühitləri əsasında təlim keçmiş tələbələrin davranış məlumatlarından istifadə olunmuşdur. Toplanan bu məlumatlar real öyrənmə ssenarilərinə əsaslanaraq müxtəlif tip tələbə profillərini modelləşdirir: aktiv və yüksək motivasiyalı, orta səviyyəli və passiv/interaktivliyi zəif olan istifadəçilər. Bu yanaşma məlumatların strukturlaşdırılmasına və müxtəlif öyrənmə tiplərinin (vizual, aktiv, reflektiv və s.) təhlilinə imkan verir.

Toplanan məlumatlarda Cədvəl 1-də təqdim olunduğu kimi 90 tələbəyə dair davranış göstəriciləri əks etdirilmişdir.

Cədvəl 1

Tələbə davranış göstəriciləri və təsvirləri

Atribut	Təsviri
Telebe_ID	Tələbənin platformaya nə qədər tez-tez daxil olduğu
Sessiya_tezliyi	Ümumi təlimə başlama sayı
Video_izleme_sayi	Baxılmış video dərslərin ümumi sayı
Test_cehdleri	Testlərə edilən cəhdlərin ümumi sayı
Oxunmush_fesiller	Platformada oxunmuş tədris mövzuları və materialları
Forum_ishtiraki	Forumda yazılmış mesajlar və qarşılıqlı ünsiyyət sayı
Tamamlanmish_praktiki_ishler	Virtual laboratoriya və simulyasiya tapşırıqları
Aktiv_gunler	Platformada aktiv olduğu günlərin ümumi sayı
Yekun_netice	Tələbənin kursun sonunda qazandığı ümumi bal
Kursdan_kecme	Tələbənin kursun minimum keçid şərtlərini ödəyib-ödəmədiyini göstərən binar dəyişən (0 = keçməyib, 1 = keçib)

Bu dəyişənlər tələbələrin tədris prosesindəki fəaliyyətlərini əks etdirir və maşın öyrənməsi modellərində istifadə olunmaq üçün optimallaşdırılıb. Məlumatlar növbəti mərhələdə təmizləmə,

normallaşdırma və klasterləşdirmə mərhələlərindən keçəcək.

Toplanmış davranış məlumatlarının keyfiyyətli və effektiv şəkildə modellərdə istifadə oluna bilməsi üçün ilkin olaraq məntiqi təmizləmə, uyğunluq yoxlaması, və ölçü vahidlərinin standartlaşdırılması həyata keçirilmişdir. Bu mərhələ tələbələrin platformada göstərdikləri fəaliyyətlərin sistemli şəkildə təhlili üçün əsas zəmindir.

Təhlilə başlamazdan əvvəl toplanılan məlumatlardakı uyğunsuzluqlar aradan qaldırılmışdır. Boş dəyərlərin miqdarı analiz edilmiş, cəmi 3 tələbədə bəzi göstəricilərin (Forum_ishtiraki, Oxunmush_fesiller) boş olduğu müşahidə edilmişdir. Bu sətirlər silinmədən, sütunlar üzrə mediana əsasən doldurulma metodu tətbiq edilmişdir:

$$x_{yeni} = median(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

“Test_cehdleri” sütunundakı bəzi tələbələr çox sayda test cəhdi ediblər (məsələn, 30 və ya daha çox), bu isə digər tələbələrin cəhd sayına nisbətən çox yüksəkdir və statistik baxımdan normal paylanmadan kənara çıxır. Bu hallar kvantillərə əsaslanan üsulla kəsilmişdir:

$$x_i = \begin{cases} q_{95}, & \text{əgər } x_i > q_{95} \\ x_i, & \text{əks halda} \end{cases} \quad (2)$$

Bu cür dəyərlər modeli yanıda bilər və öyrənmə keyfiyyətini azalda bilər. Çünki bəzi maşın öyrənməsi modelləri, xüsusilə məsafə və bölmə əsaslı modellər (k-Nearest Neighbors (k-NN), SVM, qərar ağacı), böyük dəyərləri normallaşdırmadan qəbul etdikdə yanlış təlim alırlar.

Maşın öyrənməsi modellərinin balanslı öyrənməsi üçün bütün atributlar eyni ölçü vahidində olmalıdır. Bu məqsədlə iki fərqli çevirmə üsulu tətbiq olunmuşdur:

Ən geniş istifadə olunan üsullardan biri Min-Max normallaşdırma metodudur. Bu üsul verilənləri [0,1] aralığında yenidən miqyaslandırır:

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (3)$$

burada, X – istənilən atribut üzrə orijinal (dəyişdirilməmiş) dəyər, X_{min} – həmin atribut üzrə minimum müşahidə olunan dəyər, X_{max} – həmin atribut üzrə maksimum müşahidə olunan dəyər, X' – normallaşdırılmış (ölçüləri [0,1] aralığında olan) yeni dəyərdir.

Məsələn, “Aktiv_gunler” dəyişənində minimum 3, maksimum 28 gün olmuşdur. 15 gün aktivlik göstərmiş tələbə üçün normallaşdırılmış dəyər (3) əsasında belə hesablanır:

$$X' = \frac{15 - 3}{28 - 3} = \frac{12}{25} = 0.48$$

Bu düstur xüsusilə qərar ağacı və RF kimi alqoritmlər üçün uyğunlaşdırılmış məlumat axını təmin edir.

Digər çevirmə üsulu olan Z-indeks metodu ilə isə atributların paylanması standartlaşdırılır və ortalama 0, standart kənarlaşma isə 1 olacaq şəkildə çevrilir:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

burada, X – orijinal atribut dəyəri, μ – həmin atribut üzrə orta qiymət, σ – həmin atribut üzrə standart kənarlaşma, Z – standartlaşdırılmış dəyər (Z-indeks), yəni həmin dəyərin ortalamaya nisbətən neçə standart kənarlaşma uzaqda olduğunu göstərir.

Misal olaraq, “Yekun_netice” üçün ortalama $\mu = 72.5$, standart kənarlaşma $\sigma = 12.3$ olaraq təyin edilmişdir. 88 bal toplamış tələbə üçün (4) əsasında Z-indeksi hesablasaq:

$$Z = \frac{88 - 72.5}{12.3} = \frac{15.5}{12.3} \approx 1.26$$

Bu üsul əsasən SVM və k-NN kimi məsafə əsaslı modellərdə daha uğurlu nəticələr verir.

Verilənlər çevrilərkən aparılan statistik analizlər (Cədvəl 2) göstərdi ki, normallaşdırma və standartlaşdırma nəticəsində bütün atributlar uyğun şəkildə sabitləşdirilmişdir. Xüsusilə “Yekun_netice” və “Aktiv_gunler” atributlarının Z-indeks aralığı balanslı paylanma göstərmişdir (təxminən $[-2, +2]$). Bu, modellərin təlim zamanı atributlar üzrə qeyri-bərabər təsir riskini azaldaraq daha sabit öyrənməyə şərait yaradacaq.

Cədvəl 2

Məlumatların çevrilmədən əvvəl və sonra statistik göstəriciləri

Atribut	Orta (μ)	Min	Max	Std. kənarlaşma (σ)	Min-Max normallaşdırılmış aralıq	Z-indeks aralığı
Sessiya_tezliyi	16.8	5	29	6.1	[0.00 – 1.00]	[-1.93 – 1.98]
Video_izleme_sayi	31.5	10	50	7.3	[0.00 – 1.00]	[-2.95 – 2.53]
Test_cehdleri	6.8	1	14	3.2	[0.00 – 1.00]	[-1.81 – 2.25]
Tamamlanmish_praktiki_ishler	5.1	1	9	2.2	[0.00 – 1.00]	[-1.86 – 1.77]
Aktiv_gunler	13.2	3	27	5.9	[0.00 – 1.00]	[-1.73 – 2.33]
Yekun_netice	72.5	50	98	12.3	[0.00 – 1.00]	[-1.83 – 2.08]

Eyni zamanda, Min-Max normallaşdırma bütün göstəriciləri $[0,1]$ intervalına salmış və müxtəlif ölçü vahidlərində olan atributlar arasında uyğunluğu təmin etmişdir. Bu, xüsusilə qərar ağacı və məsafəyə əsaslanan modellərin nəticələrini optimallaşdırmaq üçün vacibdir.

Məlumatlardan çıxarılan hər bir atributun proqnoz nəticələrinə təsiri fərqli ola bilər. Bu səbəbdən korrelyasiya analizi aparılmışdır ki, atributlar arasındakı əlaqələr təyin olunsun və modelə daxil ediləcək vacib xüsusiyyətlər seçilsin. Verilənlər arasında daxili əlaqələrin müəyyən edilməsi məqsədilə Pearson korrelyasiya əmsali istifadə olunmuşdur:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

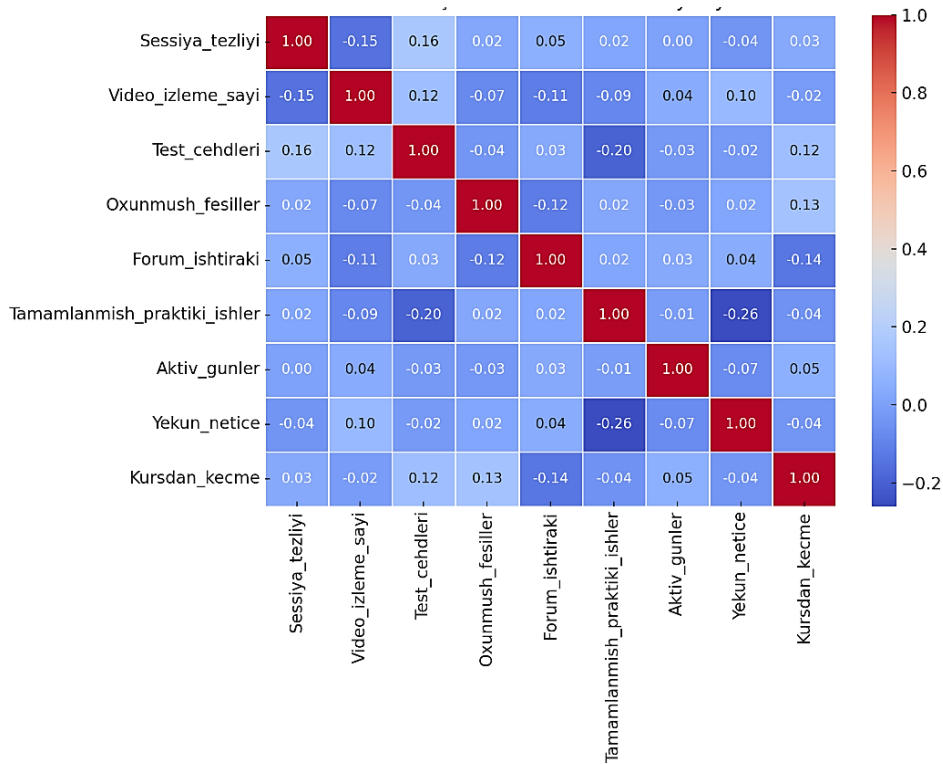
burada, $\bar{X}$ və $\bar{Y}$ – X və Y dəyişənlərinin orta qiymətləri; X_i və Y_i – X və Y dəyişənlərinin i -ci müşahidə qiymətləridir.

Bu metod, iki dəyişənin bir-birinə olan xətti əlaqəsini ölçmək üçün geniş tətbiq olunur. Korrelyasiya əmsalının qiyməti $[-1,1]$ intervalında dəyişir: 1 müsbət mükəmməl əlaqəni, -1 mənfi mükəmməl əlaqəni, 0 isə əlaqənin olmadığını göstərir. Bu analiz nəticəsində ən yüksək əlaqə “video izləmə sayı”, “aktiv günlər” və “praktiki işlərin tamamlanması” kimi göstəricilərlə “yekun nəticə” arasında müşahidə olunmuşdur.

Şəkil 2-də tələbə davranış göstəriciləri arasındakı korrelyasiyalar vizual olaraq göstərilmişdir. Aktiv günlər və praktiki işlərin tamamlanması arasında müsbət deyil, əksinə zəif mənfi korrelyasiya mövcuddur ($r = -0.01$). Bu isə onların bir-birinə demək olar ki, təsir etmədiyini göstərir. Həmçinin, forumda iştirak və yekun nəticə arasında da çox zəif müsbət korrelyasiya müşahidə olunur ($r = 0.04$), bu da forum fəaliyyətlərinin yekun nəticəyə olan təsirinin demək olar ki, əhəmiyyətsiz olduğunu göstərir. Göründüyü kimi, "Tamamlanmish_praktiki_ishler" və "Yekun_netice" arasında mənfi

korrelyasiya (-0.26) müşahidə olunur, bu isə onların əks istiqamətdə dəyişə biləcəyini göstərir.

Təhlil edilən davranış göstəriciləri arasında aparılmış korrelyasiya analizi nəticəsində ümumiyyətlə zəif xətti əlaqələrin mövcud olduğu müşahidə edilmişdir. Bu hal tələbələrin fəaliyyət və nəticələri arasında mürəkkəb, çoxfaktorlu və bəzən xətti olmayan münasibətlərin olduğunu göstərir. Belə zəif korrelyasiya dəyərləri ənənəvi statistik yanaşmaların (məsələn, sadə reqressiya modellərinin) bu əlaqələri tam izah etməkdə məhdud olduğunu göstərir.



Şəkil 2. Tələbə davranış göstəriciləri üzrə korrelyasiya matrisi

Bu səbəbdən, tələbə davranışlarını daha dəqiq təhlil etmək və onların öyrənmə nəticələri ilə əlaqəsini modelləşdirmək üçün maşın öyrənməsi alqoritmlərinin tətbiqinə ehtiyac yaranır. Maşın öyrənməsi metodları qeyri-xətti, çoxölçülü və kompleks strukturlu məlumatlarda nümunələri aşkar etməyə imkan verir. Bu yanaşma vasitəsilə ənənəvi metodların əldən verdiyi incə əlaqələr ortaya çıxarılır, tələbələrin fərdi davranış modelləri aşkarlanır və nəticə etibarilə daha effektiv proqnozlaşdırma və fərdiləşdirilmiş təhsil imkanları təmin olunur.

Təhlil edilən məlumatlar üzərində müxtəlif maşın öyrənməsi modelləri tətbiq olunmuşdur. Modellərin seçimi qərar ağacı, RF, SVM və k-NN-dən ibarət olmuşdur. Hər bir modelin məqsədi tələbə davranışlarının proqnozlaşdırılmasıdır. Bu, müxtəlif atributlara (məsələn, “Test_cehdleri”, “Forum_ishtiraki”, “Aktiv_gunler”) əsaslanaraq keçmə və keçməmə kimi siniflərdə tələbələrin təhlilini təmin etməkdir.

Qərar ağacı modelinin tətbiqi, verilənlər üzərində qaydalara əsaslanan qərarların verilməsi ilə fəaliyyət göstərir [6, s. 71-78]. Hər bir qərar nöqtəsi, müəyyən bir xüsusiyyətə əsaslanaraq verilənləri bölür, beləliklə məlumatın sinifləri müəyyən olunur. Qərar ağacının üstünlüyü onun sadəliyində və asanlıqla başa düşülməsindədir. Lakin, qərar ağacı çox zaman həddindən artıq uyğunlaşmaya meyillidir, yəni təlim məlumatlarına çox uyğunlaşır və yeni məlumatlarda zəif nəticə göstərir [7].

Bu səbəblə qərar ağacı modelini tətbiq edərkən, modelin düzgün formada qurulması üçün qarışıq qərar nöqtələrinin ölçülərini minimuma endirəcək kriteriyalar istifadə edilir: Gini qarışıqlığı və Entropiya.

Qərar ağacı modelinin əsas prinsipini anlamaq üçün ən çox istifadə olunan iki qarışıqlıq

ölçüsünü nəzərdən keçirək:

1) Gini qarışıqlığı bir qərar nöqtəsində siniflərin paylanmasını ölçür. Bu ölçü, bir qərar nöqtəsinin təmizliyini göstərir: əgər bir qərar nöqtəsində bütün nümunələr eyni sinifdən olarsa, Gini qarışıqlığı sıfır olacaq.

Gini qarışıqlığı aşağıdakı düsturla hesablanır:

$$G = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (6)$$

burada p_i – i-ci sinifin ehtimalı, n – sinif sayıdır.

Gini qarışıqlığının məqsədi qarışıqlığı elə bölməkdir ki, ən təmiz qərar nöqtəsini əldə edək, yəni siniflər arasındakı qarışıqlığı minimuma endirək. “Test_cəhdləri” atributunun iki sinifə bölünməsinə təhlil edək: sinif 1 (keçmiş testlər) və sinif 2 (keçməmiş testlər).

- ✓ Sinif 1 (keçən tələbələr): 70 tələbə (70%)
- ✓ Sinif 2 (keçməyən tələbələr): 20 tələbə (20%)

Bu zaman sinif 1 və sinif 2-nin ehtimalları belə hesablanır:

$$p_1 = \frac{70}{90} = 0.78 \text{ (keçən tələbələr)}$$

$$p_2 = \frac{20}{90} = 0.22 \text{ (keçməyən tələbələr)}$$

Bu halda, Gini qarışıqlığı (6)-ya əsasən belə hesablanır:

$$G = 1 - (0.78^2 + 0.22^2) = 0.3432$$

Bu Gini qarışıqlığı dəyəri göstərir ki, qərar nöqtəsindən orta səviyyədə qarışıqlıq var və daha təmiz bir qərar nöqtəsi əldə etmək üçün başqa xüsusiyyətlərdən istifadə etmək mümkündür.

2) Entropiya isə bir qərar nöqtəsinin qarışıqlığını ölçür. Yuxarıdakı siniflərə bölünmənin ehtimalları ilə entropiya aşağıdakı kimi hesablanır:

$$H(S) = - \sum_{i=1}^c p_i \log_2 p_i \quad (7)$$

burada, c – qərar nöqtəsində mövcud olan siniflərin sayını təmsil edir (məsələn, əgər iki sinif (keçən və keçməyən tələbələr) varsa, $c = 2$ olacaq); p_i – i-ci sinifin ehtimalı; $\log_2 p_i$ – ehtimalın loqarifması hesablanır. (7) əsasında dəyərləri yerinə qoysaq:

$$H(S) = - \sum_{i=1}^c p_i \log_2 p_i = -(0.78 \log_2 0.78 + 0.22 \log_2 0.22) = 0.757$$

Entropiya dəyəri 0.757 olaraq tapılmışdır, bu da qərar nöqtəsində yüksək qarışıqlığın olduğunu göstərir və məlumatın daha təmiz hala gətirilməsi üçün daha yaxşı bir bölmə tələb olunur mənasına gəlir.

Qərar ağacı modelinin tətbiqindən sonra test dəqiqliyi 85% olmuşdur. Bu nəticə, Gini qarışıqlığı və entropiya hesablamalarının nəticələrinə əsaslanaraq modelin düzgün formada qurulduğunu və verilənləri yaxşı bölməyə imkan verdiyini göstərir. Gini qarışıqlığı və entropiya dəyərləri göstərir ki, model orta səviyyədə qarışıqlığı idarə edir və daha təmiz bölmələr üçün başqa atributlardan istifadə etmək mümkündür.

RF modeli də 90 tələbənin məlumatları üzərində təlim edildi. Məlumatların 80%-i təlim üçün, 20%-i isə test üçün ayrıldı. RF modelində 100 ayrı ayrı qərar ağacı yaradılıb və hər bir ağac fərqli alt-səviyyələr üzrə təlim edilərək nəticələr çıxarıb. Sonra bu 100 ağacın verdiyi nəticələr birləşdirilib, ən yaxşı nəticə əldə edilib. Tələbələr "Test_cehdleri", "Forum_ishtiraki" və "Aktiv_gunler" kimi atributları istifadə olundu. RF modelində çox sayda ağacın birləşdirilməsi, modelin nəticələrinin daha dəqiq və etibarlı olmasına kömək edir, çünki hər bir ağac fərqli məlumatlarla təlim edilir və ümumi nəticələr ağacların ortalamasına əsaslanır. Bu da modelin ümumiləşdirmə qabiliyyətini artırır.

Cədvəl (3)-də modellərin fəaliyyət göstəriciləri təqdim edilir və bu da hər bir modelin təhlil nəticələrini müqayisə etməyə imkan verir.

Burada təqdim edilən dəqiqlik, həssaslıq, tamlıq, F1-indeks, orta müsbət xəta, kök orta kvadrat xəta və R^2 kimi metriklər, hər bir modelin proqnozlaşdırma qabiliyyətini və xətalarını ölçür. RF modelinin ən yaxşı nəticələri göstərməsi, çoxsaylı ağacların birləşdirilməsinin modelin daha sabit və etibarlı nəticələr verməsinə səbəb olduğunu nümayiş etdirir [8]. k-NN modelinin aşağı nəticələri isə məsafə ölçmələrinin böyük verilənlərdə və qeyri-bərabər paylanmalarla daha az effektiv olduğunu göstərir [9].

Cədvəl 3

Modellərin qiymətləndirmə nəticələri

Model	Dəqiqlik (%)	Həssaslıq (%)	Tamlıq (%)	F1-indeks (%)	Orta müsbət xəta	Kök orta kvadrat xəta	R^2
DT	85%	83%	88%	85%	1.3	2.5	0.78
RF	90%	92%	89%	90%	0.9	2.0	0.85
SVM	88%	85%	87%	86%	1.1	2.2	0.81
k-NN	80%	78%	75%	76%	1.6	3.0	0.72

Nəticə. Bu məqalədə, virtual təhsil mühitlərində tələbə davranışlarının təhlili və bu məlumatların intellektual qiymətləndirilməsi məqsədilə maşın öyrənməsi modelləri tətbiq edilmişdir. Qərar ağacı, RF, SVM və k-NN modelləri tələbə məlumatlarının keçmə və keçməmə kimi siniflərdə proqnozlaşdırılmasında istifadə olunmuşdur.

RF modelinin ən yüksək nəticəni göstərməsi, modelin çoxsaylı ağaclardan ibarət olması və nəticələrin ortalamasına əsaslanması ilə əlaqədardır. Qərar ağacı modeli, sadəliyi və asanlıqla izah edilə bilməsi ilə seçilir, lakin həddindən artıq uyğunlaşma riskini idarə etmək üçün daha diqqətli yanaşma tələb edir. SVM isə daha mürəkkəb verilənlərdə yüksək nəticə göstərdi, lakin k-NN modeli daha aşağı nəticələr verdi.

Məlumatların təmizlənməsi, normallaşdırılması və standartlaşdırılması mərhələləri, modelin nəticəsini artırmaq üçün mühüm rol oynadı. Təlim verilənlərinin düzgün işlənməsi və maşın öyrənməsi modellərinin düzgün seçilməsi, nəticələrin daha dəqiq və etibarlı olmasına imkan yaratdı.

Bu tədqiqatın nəticələri göstərir ki, maşın öyrənməsi modelləri, tələbə davranışlarının proqnozlaşdırılması və fərdi tədris strategiyalarının hazırlanması üçün çox faydalıdır. Gələcəkdə dərin öyrənmə yanaşmaları və emosional, sosial faktorların daxil edilməsi ilə daha mürəkkəb təhlillər aparmaq mümkündür.

ƏDƏBİYYAT

1. Nazempour R., Darabi H. Personalized Learning in Virtual Learning Environments Using Students' Behavior Analysis. *Education Sciences*, 2023, №13(5), 457.
2. Onofrio R. et al. A New Approach to Investigate Students' Behavior by Using Cluster Analysis as an Unsupervised Methodology in the Field of Education. *Applied Mathematics*, 2016, №7(15), s. 1649-1673.
3. Bayan A., Mohammed B., Madini A. The power of Deep Learning techniques for predicting student performance in Virtual Learning Environments: A systematic literature review. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 2024, №6, 100231, ISSN 2666-920X.
4. Stephen O. Predicting Students' Performance Using Machine Learning Algorithms: A Review. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 2023, №16(3), 128-148.

5. Mohammad Kh., Martin E. Learning Analytics: Principles and Constraints. In Proceedings of World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications, 2015, s. 1326–1336.
6. Quinlan, J. R. C4.5: Programs for Machine Learning. San Francisco, Morgan Kaufmann, 1993, 302 s.
7. Əhmədov L.N., Osmanlı T.E. Virtual texnologiyaların təhsilin keyfiyyətinə təsirinin informasiya və sistemli analiz əsaslı intellektual qiymətləndirilməsi üçün metod və alqoritmlər. Milli Aviasiya Akademiyası, Elmi məcmuələr, 2025, Cild. 27, №2, s. 31–45.
8. Liu, Y., Wang, S. Improved random forest model for classifying student behavior patterns in online learning platforms. Journal of Educational Data Mining, 2020, №12(3), s. 52–66.
9. Bhatnagar R., Bhandari D. Evaluating k-Nearest Neighbors Algorithm for large datasets. Journal of Data Science and Machine Learning Applications, 2020, №6(2), s. 113–124.

MAŞIN ÖYRƏNMƏSİ ƏSASINDA VİRTUAL TƏHSİL PLATFORMALARINDA TƏLƏBƏ DAVRANIŞLARININ TƏHLİLİ

T.E.Osmanlı

Xülasə. Bu tədqiqat, virtual təhsil platformalarında tələbə davranışlarının maşın öyrənməsi metodları ilə təhlilini və proqnozlaşdırılmasını araşdırır. Son illərdə onlayn təhsil mühitlərində tələbələrin öyrənmə fəaliyyətləri haqqında toplanan məlumatlar, onların davranışlarını analiz edərək fərdiləşdirilmiş tədris strategiyalarının hazırlanmasına imkan verir. Tədqiqatda, qərar ağacı, Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) və k-Nearest Neighbors (k-NN) kimi maşın öyrənməsi modelləri tətbiq olunmuş, hər bir modelin tələbə nəticələrinə təsiri və proqnozlaşdırma qabiliyyəti qiymətləndirilmişdir. Nəticələr göstərir ki, RF modelinin daha dəqiq və etibarlı nəticələr verdiyi, k-NN modelinin isə böyük verilənlərdə və qeyri-bərabər paylanmalarla zəif nəticə göstərdiyi müşahidə edilib. Tədqiqat, tələbə davranışlarının analizi üçün maşın öyrənməsinin effektiv olduğunu və gələcəkdə daha mürəkkəb modellərlə təkmilləşdirilə biləcəyini göstərir.

Açar sözlər: virtual təhsil platformaları, tələbə davranışlarının təhlili, qərar ağacı, proqnozlaşdırma modelləri, maşın öyrənməsi alqoritmləri.

Accepted: 18.11.2025

PRACTICAL INTEGRATION OF ISO 9001 AND ISO/IEC 17025 FOR INDUSTRIAL QUALITY CONTROL AND TECHNICAL COMPETENCE

Mahammadali Gazanfar Aliyev, Arzu Eldar Ibrahimova

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

mahammadalialiyev0@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8377-5503>

arzu.ibrahimova@asoiu.edu.az, <https://orcid.org/0000-0002-3646-323X>

Abstract. The ceaseless pursuit of stopping and sustaining quality control became an ideal with which organizations strive to keep their competitiveness and trust. Considered to be the most prominent worldwide quality management framework, ISO 9001 proposes a systematic approach towards process effectiveness, risk-based thinking, and customer orientation. However, while ISO 9001 represents the strategic foundation of quality systems, it does not address the direct technical competence of the testing and calibration laboratories. In this situation, ISO/IEC 17025 builds upon and complements those standards by ensuring logging is valid, reliable, and accurate in the test results. The paper sets ISO 9001 as a leader in sculpting credible quality control systems and looks into the extra value gained from technical reliability by ISO/IEC 17025. The comparative analysis shows that the integration of both standards provides a balanced framework that combines the best of management by way of laboratory competence. The evidence tends to show that while ISO 9001 renders life to organizational sustainability by means of strategic management, ISO/IEC 17025 makes technical credibility.

Keywords: *Quality management Systems, standard Integration, ISO/IEC 17025, technical reliability, ISO 9001, calibration.*

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

INTRODUCTION

Achieving reliability, competitiveness, and sustainability requires quality control, a baseline requirement for today's ever-dynamic environment. Increasingly complex industrial processes, coupled with mounting regulatory, and customer expectations, have put the international standards in focus for implementation. Among these, ISO 9001 remains the most popular quality management framework applied. It guides an organization to structure itself and its operations to set up processes, observe them, and improve upon them while also advocating risk-based thinking, continual improvement, and customer satisfaction. Being universally applicable to diverse sectors underscores its stature as a leader in calling for the implementation of effective and sustainable quality management systems. [1-2]. Although the standard's high scope, ISO 9001 does not adequately focus on technical competency prerequisites in the laboratory setting. ISO/IEC 17025 fills this void by establishing benchmark requirements for the competence of testing and calibration laboratories. By ensuring the accuracy, validity, and reliability of laboratory results, the ISO/IEC 17025 standard adds technical depth to quality systems. While ISO 9001 lays official groundwork, ISO/IEC 17025 confirms that labs generate accurate and consistent results.

The synergy of these two standards enables the organization to set a clear way and optimize its resources (ISO 9001), in addition to ensuring that the laboratory is technically competent (ISO/IEC 17025). Together, they enhance stakeholder confidence, operational efficiency, and sustainable development. The study analyses the leadership role of ISO 9001 in quality control and the include value of ISO/IEC 17025 in laboratory competence. By checking the tools' integration, the paper seeks to demonstrate how firms can achieve balanced quality systems that support long-term resilience and competitive advantage [2].

METHODOLOGY

Evolution of Quality Management Standards

Organizations in today's competitive environment need to balance strategic quality management (to effectively protect the long-term health of the organization) and technical competency (to effectively build ongoing trust) to successfully eliminate viable competitors. ISO 9001 accurately

lays out a framework to ensure process effectiveness, risk-based thinking, and ultimately ensure customer orientation; however, ISO 9001 does not guarantee the technical validity of testing and calibration. This shortcoming results in a challenge for laboratories and organizations to demonstrate the accuracy and reliability of results. ISO/IEC 17025 is developed to enhance ISO 9001 and help organizations build technical credibility, however the integration of ISO 9001 and ISO/IEC 17025 to support a comprehensive quality system remains poorly explored [2-3].

Over the years, the definition of quality management has significantly changed. Historically, quality management was a rather limited activity that consisted largely of inspection activity, whether the product worked as expected, and deciding what to do with it if it did not meet requirements. Wider dimensions such as system improvement or future action were not considered [2]. The introduction of ISO 9001 in 1987 represented a notable change that shifted the viewing of this topic from product level checks to management system performance (knowing customer satisfaction was key). The subsequent improvements to ISO 9001 have continued to add topics such as improvement, leadership and alignment with the organization in the delivery of quality. Therefore, what began as a limited inspection perspective, has grown into an integrated, and holistic system to support organizational excellence.

ISO 9001 has grown to be the most recognized standard in the area of internationally recognized standards for quality management. It has become a symbol of a commitment to consistency and continual improvement within organizations. It provides a structured approach for organizations that want to improve process effectiveness, improve customer satisfaction, and manage risk. It establishes principles focusing on leadership and engagement, customer focus, engaging in realistic risk management, and a culture open to improvement as is embedded into the standard. Studies suggest organizations who implement ISO 9001 demonstrate greater operational discipline and better quality in their products and services leading to better customer trust. ISO 9001 can be used by almost any organization, and generalizes to almost any sector; there are no limitations on sectors in other spaces, i.e. service. It is also easy to align it with related standards like ISO/IEC 17025 for lab competence and management systems for environmental management systems and occupational health and safety management systems. It can create a more holistic approach to organizational performance and sustainability. [2]. ISO 9001 provides a general framework for quality management within organizations that is still useful, but it also removes the depth of technical rigor needed to be effective for laboratory environments. Laboratories that perform testing and calibration need to have expanded standards for technical competence, impartiality, traceability, and accuracy, and the best standard available for these attributes is ISO/IEC 17025 [3]. ISO/IEC 17025 provides internationally accepted requirements for technical competence and impartiality. Laboratories that meet the requirements of the standard must demonstrate clarifying methodology, calibrate instruments that are traceable to their comparisons, and provide for audits within documents that all result in providing and increase the validity of its results. Research has shown when laboratories are accredited ISO/IEC 17025 their errors are less, their data is more reliable, and their stakeholders trust them. Since ISO/IEC 17025 provides enhanced value for laboratory operations, it is not in competition; instead, ISO/IEC 17025 is necessary when promoting scientific integrity and successful operations [4].

Using ISO 9001 and ISO/IEC 17025 together means laboratories have a complete framework that can align both organizational quality management and technical competence. ISO 9001 is the framework for a successful management system: it places importance on leadership, customer satisfaction and continual improvement. ISO/IEC 17025 gives credibility to results from testing and calibration so they are valid, reliable, and accurate. Combining these standards together has shown to increase efficiency through eliminating duplicate documentation, maximize resources included and improving improved communication collaboration from leadership to the technical side of an organization [4]. This relationship improves risk management and customer confidence, which also directly improves credibility related to laboratory results. However, there are challenges that laboratories have

faced in applying these standards. Possible barriers include moving towards more bureaucratic protocols involved in having an extensive amount of documentation, included learning curves some staff might encounter from the review and revision of policies and procedures; as well as time and resource commitments. To be able to realize the intended result from the dual implementation of these standards, laboratories should be clear in assigning roles and responsibilities, streamline processes, and find out which departments need to improve working effectively together, if applicable through to the management side and staff and technical teams, to remove unnecessary bureaucracy in working together, and to improve overall efficiency of the laboratory [3].

Data Sources: We got data from two main types of sources. The first kind, primary sources, was stuff like lab quality books, standard work steps (SOPs), ISO check reports, and in-lab tuning records. The second kind, secondary sources, had scholarly papers, books, industry reports, and official ISO rules (ISO 9001:2015 and ISO/IEC 17025:2017). Using both primary and secondary sources let us see real, hands-on stuff and also base our work on solid theory.

- **Document Check:** We look into lab steps, quality guides, and audit logs to see if they fit with ISO 9001 and ISO/IEC 17025.

- **Dicussions:** We have planned talks with quality heads and lab staff to learn about real problems, good points, and thoughts on using two standards.

- **Observation:** We observe laboratory operations to ensure compliance with established protocols and to evaluate the efficiency and overall performance of the workflow.

For this work, we mixed many ways of study which included looking at files, talking to people, and watching how things are done. This was to look into how ISO 9001 and ISO/IEC 17025 standards fit into quality check systems. We first looked at lab quality books, how things are usually done, and ISO check reports to see if they met both standards. This let us spot how manager needs under ISO 9001 and skill needs of ISO/IEC 17025 align. We saw places where they overlapped, where there were gaps, and chances to make things better, setting a strong base for a deep quality check. We also spoke to people such as quality heads, lab bosses, and tech workers. These talks were to gather real thoughts on the hard points, good things, and what you need to use both standards at once. People shared their stories on joining the two, how well training worked, changes in workflow, and how it all affected the lab and the whole place's work [5]. The talk brought clear details on how this two-rule plan works in real life and what helps make it work well. Also, we watched lab work to see if it met the written rules and worked well. Watching helped check if the steps are used right and showed how manager and tech rules are kept in real use. This was key to find differences between what the rules say and what really happens in labs, giving real info for making things better (Figure 1) [6].



Figure 1. Data collection scheme

Then, we looked at the data by comparing and spotting themes. We found where ISO 9001 and ISO/IEC 17025 fit together or added to each other, and looked at how place leadership and tech trust work together. We focused on how well things work, lab rightness, can track back sources, cutting mistakes, and trust from people who care. The aim was to see how well the joined system works in both the managing and tech parts of quality control. Even with our full method, some limits were there. We had little access to private lab info, which cut down the kinds of main sources we could use. The number of labs we looked at was quite small, which might affect how wide we can apply what we found. Also, different ways labs work in different areas might sway results. To deal with these issues, we used data from many sources like inside files, talks, watching, and known studies. This mix made our findings sounder and fairer, making sure our ending points covered both the idea and real use of joined quality control systems [7].

Good quality control in today's labs depends a lot on smart planning based on risks and setting clear goals that you can check. In places that do tests, calibration, or make things, it is key to look ahead for possible errors and make plans to avoid them to keep high standards. By spotting risks early, labs can stop many mistakes, get better at what they do, and work more smoothly. This way, they don't just fix problems when they happen but can get ahead of them, making sure they deal with issues before they affect their work or make customers unhappy.

In labs, risk planning means checking all parts of a test from start to end. Things that might go wrong include tools breaking, people making mistakes, dirty samples, or wrong measuring ways. By thinking about these things early on, labs can set up steps like standard ways of working, checking tools often, and making sure testing ways work right. With clear goals in place, this plan makes sure all parts of a lab work well together, meeting the quality the organization wants and supporting both the tech and management sides. Setting goals is a big part of this planning. Labs make goals that are clear, measurable, doable, important, and timely (SMART) for improving quality control. These might be goals like cutting down mistakes, getting more reliable test results, teaching staff better, or giving results faster. When these goals connect to checking risks, labs can tackle the most important tasks that help them work better and more dependably. Tying goals and risk checks together gives a strong plan for ongoing improvement, helping labs keep track and tweak their methods as needed based on what they find (Figure 2).



Figure 2. Risk management process.

This kind of planning helps use resources well and gets staff involved. By knowing where errors or waste might happen, managers can use tools, training, and people better, making sure every part of the lab works its best. Workers understand their roles better and what could go wrong, leading to a workplace that fixes issues before they happen. Labs that work this way see real gains like better rule-following, fewer problems, and more trust from those they work with and serve.

Finally, bringing risk-based planning and goal setting together supports long-lasting improvement and good quality control. By keeping an eye on risks and tying them to specific goals, labs stay ready to meet new tech needs, rules, and what customers want. With a focus on staying ahead, accurate checking, and ongoing review, quality control stays solid, helpful, and ready for the future, building a base for top technical work and overall success [8].

Combining managerial quality standards and technical laboratory practices offers great benefits but also presents extreme operating challenges. The primary challenge involves coordinating organizational management processes with technical laboratory procedures. Management standards are leadership, strategic planning, and workplace safety oriented, whereas laboratory standards prioritize methodological accuracy, documentation, validation, and result reliability [7]. In reality, laboratories often encounter conflicts in attempting to harmonize these methodologies with one another and, as a consequence, potential inefficiencies, documentation inconsistencies, and workflow reductions. Good communication, clear roles, and ongoing monitoring are needed to minimize risks that could undermine quality. Workload and resource management is another needed challenge. Laboratories must invest large amounts of time, money, and man-power to provide training, maintain equipment, perform audits, and adhere to dual regulatory requirements. Smaller labs, on the other hand, may struggle to maintain adequate staffing and finances to fund such needs in a sustainable manner. To put it simply, recent review of a mid-sized lab revealed that adherence to managerial and technical standards introduced around 30% documentation burden, which underscored the importance of strategic planning and risk-based methods for maintaining operational effectiveness. Change management is also of utmost importance. Implementation of two sets of standards requires laboratory alteration of workflows, updating procedures, and restating staff roles [8]. Inability to train or opposition to change may be a hindrance to conformity. Empirical evidence shows that laboratories having frequent training, workshops, and scenario drills achieve higher conformity to standards while maintaining staff interest. Successful proactive risk assessment and correction planning optimize preparedness whereby small errors do not escalate into significant quality issues. Technology solutions have a significant role to play in the future in terms of handling integration problems. Automation, Laboratory Information Management Systems (LIMS), and intelligent monitoring technologies improve data monitoring, facilitate monitoring of compliance in real-time, and reduce human errors. For instance, the application of an automated laboratory system reduced manual data entry errors by over 40% and improved test and audit monitoring, demonstrating the capability of technology in integrated quality management [9]. International harmonization of quality standards is also a future path. International laboratories must demonstrate conformity with disparate regulatory requirements and customer expectations. Comparative analysis and international benchmarking exercises help ensure consistency, gain confidence in laboratory results, and enhance stakeholder confidence. Finally, continuous learning is a necessity. Training of employees in new standards, computer software, and risk management ensures long-term adaptation of managerial and technical quality requirements [10]. Labs that focus on ongoing learning achieve higher operational confidence, adaptability, and long-term effectiveness in possessing total quality systems.

Conclusion

This study shows that mixing good management planning with high lab skill boosts how well and how trusty quality control systems work. By using clear management steps with strong tech rules,

labs can get better at measuring things, keeping methods the same, and working more well. The review points out how key it is to plan with risks in mind, set clear goals, and keep checking everything to stop mistakes and fix wrongs.

The findings also show that when laboratory management and technical methodologies are effectively integrated, positive outcomes are achieved. Laboratories that use both rules see clearer jobs, better discussions between bosses and laboratory workers, and smarter use of what they have. Some problems like more papers to fill, more work for staff, and hard starts were seen; however, clear steps such as training workers, making work flow better, and using tech can solve these well. Looking ahead, joining management and tech rules lays the ground for strong, ready-for-the-future quality setups. Tech growth, going digital, and always getting better will help labs do even better, be more trustworthy, and follow rules well. In all, the study proves that using both ways helps build a setting of always getting better, makes those involved trust more, and keeps lab work strong, tough, and good.

REFERENCES

1. Alshahrani M.A., Husain K. The effectiveness of the implementation of ISO 9001 on SMEs performance: the case of an emerging economy. *Int. J. of Quality & Reliability Management*, vol. 41, no. 3, pp. 612–630, 2023.
2. International Organization for Standardization. (2017). ISO 9001:2015 – Quality management systems — Requirements. Geneva: ISO
3. ISO/IEC 17025:2017 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva: ISO/IEC.
4. Azərbaycan Standartlaşdırma İnstitutu. (2019). ISO/IEC 17025:2017 – Sınaq və kalibrəmə laboratoriyalarının kompetensiyası üçün tələblər. Bakı: AZSTAND.
5. Kumar A. Risk-based planning in modern laboratory management systems. *Int. J. of Quality & Reliability Management*, vol. 37, no. 5, pp. 825–839, 2020.
6. Panagiotidou E., Chountalas P.T., Magoutas A.I., Georgakellos D.A. & Lagodimos A.G. Systematic Identification and Validation of Critical Success Factors for ISO/IEC 17025 Implementation, 2024.
7. Azərbaycan Standartlaşdırma İnstitutu. (2018). ISO 9001:2015 – Keyfiyyət idarəetmə sistemləri. Tələblər. Bakı: AZSTAND.
8. Wickramaratne K.A.C. Risk based quality management: the way forward to improve quality in medical laboratories. *Sri Lanka Journal of Haematology*, vol. 15, no. 1, pp. 12–18, 2023.
9. Həsənov R. Laboratoriyalarda ISO/IEC 17025 standartının tətbiqi və texniki sərəşə. Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Elmi Jurnal, 2019, №4, s. 45-53.
10. <https://www.researchgate.net/publication/276901246> Quality management
11. https://iso-docs.com/blogs/iso-9001-qms/qms-risk-management-iso-9001?srsId=AfmBOorLpmI3iA08Kg-_aUFExPevegAuZ_CHeJz5S7Cf4IPXWBOduZCa
12. <https://mandeguidelines.iom.int/en/clone-methodologies-data-collection-and-analysis-monitoring-and-evaluation>

Accepted: 24.11.2025

THE EVOLUTION OF THE PDCA CYCLE IN THE CALIBRATION PROCESS: FROM PROCEDURAL COMPLIANCE TO A STRATEGIC, RISK-BASED PARADIGM

Rashid Rashad Mammadov

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

mamedovrashid05@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5543-236X>

Abstract. This article traces the evolution of the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle's application in calibration processes, charting its transformation from a simplistic procedural loop to a sophisticated, strategic management framework. It aims to systematize the understanding of how metrological assurance has integrated principles of continuous improvement over time. The research employs a critical literature review and a qualitative synthesis of historical and contemporary practices in metrology and quality management. The analysis is framed by the transformative impact of key international standards, notably ISO 9001 and ISO/IEC 17025, alongside the disruptive potential of Industry 4.0 technologies. The study deconstructs the application of PDCA within calibration across distinct developmental eras. The analysis identifies three principal evolutionary stages. The first is a Compliance-Driven Loop, characterized by reactive, document-centric practices and fixed calibration intervals. The second is an Integrated Process Approach, where calibration becomes an integral component of the quality management system, incorporating concepts of measurement uncertainty and systematic corrective action. The third and current stage is the Strategic, Risk-Based Paradigm, or "Calibration 4.0." The primary contribution of this article is the conceptualization of this evolutionary trajectory, which has not been systematically addressed in prior literature.

Keywords: *PDCA cycle, ISO/IEC 17025, quality management, risk-based thinking, Calibration 4.0.*

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

INTRODUCTION

Metrological calibration stands as the bedrock of empirical science and industrial production, serving as the formal process that ensures measurement results are accurate, reliable, and universally comparable. It is the indispensable activity that underpins metrological traceability – the unbroken chain of comparisons linking a measurement on the factory floor to a primary national or international standard [1, p. 51]. This traceability is not a mere academic exercise; it is the fundamental enabler of global commerce, allowing for the interchangeability of components manufactured continents apart. It guarantees the safety and efficacy of medical devices, the integrity of pharmaceutical formulations, and the validity of scientific research. Without a robust and rigorously managed calibration system, an organization's claims of quality, safety, and conformity are built on an unverifiable foundation, exposing it to significant technical, financial, and reputational risks. The data derived from measurements becomes suspect, rendering process control efforts arbitrary and product acceptance decisions unreliable.

Concurrently, the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle, a concept originating with Walter A. Shewhart's work on statistical process control and later championed by W. Edwards Deming as a cornerstone of his management philosophy, represents the quintessential model for continuous improvement [2, pp. 413-415; 3, pp. 124-130]. While often depicted as a simple four-step loop, its theoretical underpinnings are profound. It is an iterative, dynamic model for organizational epistemology – a method by which an organization systematically learns from its experiences, corrects deviations, and institutionalizes improvements. As codified in successive versions of the ISO 9001 standard, the PDCA cycle has evolved from a tool for shop-floor problem-solving into an overarching framework for strategic management, applicable to every process within a Quality Management System (QMS).

The inherent symbiosis between these two pillars of quality science – calibration and the PDCA cycle – is profound yet often understated. Calibration provides the objective, reliable data that fuels the 'Check' phase of the cycle. It is the sensory apparatus of the QMS, translating physical properties into quantitative information. Without properly calibrated instruments providing measurements with a known and suitable uncertainty $u(y)$, the "Check" phase is compromised by GIGO ("garbage in, garbage out"), rendering the subsequent "Act" phase ineffective or even counterproductive. Despite this critical interdependence, the integration of these concepts has not been static. Their relationship has co-evolved, shaped by maturing standards, technological revolutions, and a more sophisticated understanding of risk. This paper argues that the application of PDCA to the calibration process itself has followed a distinct evolutionary path, transforming from a perfunctory compliance activity into a dynamic, strategic function central to modern organizational resilience and performance.

METHODOLOGY

Problem Statement

Despite the conceptual synergy between the goals of calibration (measurement assurance) and PDCA (continuous improvement), the specific application and evolution of the PDCA cycle within the specialized domain of calibration have not been systematically analyzed in academic literature. Initial adoptions of quality systems often treated the application of PDCA to calibration in a superficial, procedural manner, focusing on scheduling and record-keeping rather than genuine process improvement. The literature lacks a longitudinal perspective that tracks how this application has matured from a rudimentary compliance mechanism into a sophisticated, risk-based strategic function. Consequently, its full potential within the context of modern technological advancements is not fully conceptualized.

This article begins with a review of the foundational literature on the PDCA cycle and calibration process management. The core of the paper is a chronological and thematic analysis of the three distinct evolutionary phases of PDCA's application in calibration. Following this analysis, a discussion section explores the implications of this evolution, presents a refined conceptual model of a modern PDCA cycle for calibration, and analyzes its challenges and enablers. The paper concludes by summarizing its contributions and proposing directions for future research.

The PDCA Cycle in Quality Management

The PDCA cycle is an iterative four-step management method used for the control and continuous improvement of processes and products. Originally conceived by Walter Shewhart, it was widely promoted by W. Edwards Deming as a systematic approach to learning and improvement [3, p. 41-43]. The four phases are:

- Plan: Establish objectives and processes necessary to deliver results in accordance with the expected output (the target or goals).
- Do: Implement the plan, execute the process, make the product.
- Check: Study the actual results (measured and collected in "Do") and compare against the expected results (targets or goals from the "Plan") to ascertain any differences.
- Act: Request corrective actions on significant differences between actual and planned results. Analyze the differences to determine their root causes and implement systemic changes.

The ISO 9001:2015 standard explicitly embeds this logic into its structure, advocating for a process approach that incorporates PDCA thinking and risk-based thinking at all levels of an organization's Quality Management System (QMS).

Calibration Process Management and Key Concepts

The management of calibration processes is governed by a distinct body of knowledge and standards, primarily ISO/IEC 17025 ("General requirements for the competence of testing and calibration laboratories"). Central to this field are several key concepts:

Metrological Traceability: The property of a measurement result whereby the result can be related to a reference through a documented unbroken chain of calibrations, each contributing to the measurement uncertainty [1, p. 51].

Measurement Uncertainty: A non-negative parameter characterizing the dispersion of the quantity values being attributed to a measurand, based on the information used. The evaluation and expression of uncertainty are standardized by the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM), which provides a rigorous mathematical framework for its calculation, often expressed as a standard uncertainty, $u(y)$, or an expanded uncertainty, $U = k \times u(y)$, where k is a coverage factor.

Conformity Assessment: The process of determining whether a given instrument or measurement result conforms to specified requirements, often involving decision rules that account for measurement uncertainty.

The literature on QMS thoroughly covers PDCA, and the metrology literature provides exhaustive detail on calibration management. However, the intersection of these two fields is often treated implicitly. Publications may mention "managing the calibration program" within a QMS, but few critically analyze how the PDCA methodology has been, and should be, applied specifically to the calibration process itself. The existing body of work lacks a dedicated analysis of the evolutionary trajectory of this application, failing to connect the dots between the shift in quality management paradigms (from compliance to risk-based thinking) and the corresponding maturation of calibration practices. This article aims to fill that specific gap [4].

The Evolutionary Trajectory of PDCA in Calibration

The application of the Plan-Do-Check-Act cycle to calibration is not a monolithic concept but a dynamic one that has matured significantly. Its trajectory can be deconstructed into three distinct, sequential paradigms, each shaped by the prevailing quality management philosophies, international standards, and technological capabilities of its era. This section provides a detailed analysis of this evolution, from a perfunctory procedural loop to an integrated strategic system.

Phase 1: The Compliance-Driven Loop (The Traditional Era)

This initial phase corresponds to the early adoption of formal quality systems (e.g., ISO 9000:1987) where the focus was heavily on documentation and demonstrable compliance. The application of PDCA was often superficial, treating calibration as an isolated, technical necessity rather than a process to be improved.

PLAN: The "plan" was fundamentally a schedule, not a strategy. Calibration intervals were established based on generic, one-size-fits-all criteria, predominantly OEM (Original Equipment Manufacturer) recommendations or arbitrary industry norms (e.g., the ubiquitous "annual calibration"). This calendar-based approach lacked empirical justification specific to the instrument's application, environment, or observed performance. Planning was devoid of risk assessment; a low-impact, non-critical gauge was often subject to the same rigid interval as a high-precision standard used for final product acceptance. The objective was simply to have a plan that an auditor could verify.

DO: The execution phase was centered on the procedural act of calibration. A technician would follow a documented procedure, perform the comparison, and record the results. The emphasis was on the ritual of the task and the creation of a calibration record or certificate – the physical evidence that the "doing" had occurred. Critical metrological concepts, such as a formal evaluation of the measurement uncertainty, were often absent or poorly understood outside of high-level laboratories.

CHECK: Verification was rudimentary, typically a binary comparison of the "as-found" measurement result against a static, pre-defined tolerance. The outcome was a simple pass/fail determination, often signified by a green "Calibrated" sticker. This check failed to account for the uncertainty of the calibration measurement itself. A result falling just inside the tolerance limit, when considering the expanded uncertainty (U), might have a significant probability of being truly out-of-tolerance, a nuance completely lost in this paradigm [5, p. 26].

ACT: Action was exclusively reactive and corrective, not preventative. If an instrument failed calibration (i.e., was found out-of-tolerance), the standard action was to adjust or repair it until it passed. This fulfilled the immediate need to return a functional instrument to service. However, it rarely triggered a deeper inquiry. The root cause of the instrument's drift or failure was not investigated, nor was there a systematic process to evaluate the potential negative impact of its out-of-tolerance state on products measured since its last valid calibration. The PDCA loop was closed at the level of the individual instrument, with no feedback to the broader system.

Analysis: This phase is best characterized as a Tayloristic, document-centric model. It treated calibration as a discrete, disconnected task focused on maintaining the operational status of equipment. The PDCA cycle was a micro-cycle, confined to the instrument itself, and served primarily as an artifact for auditors. It was a system designed to demonstrate control, but it lacked the mechanisms for genuine process understanding or systemic improvement.

Phase 2: The Integrated Process Approach (The ISO 9001:2000 and ISO/IEC 17025 Era)

The release of ISO 9001:2000, with its mandate for a "process approach," and the maturation of ISO/IEC 17025 as the global standard for laboratory competence, served as powerful catalysts for change. These standards compelled organizations to view calibration not as an isolated task, but as a critical process interconnected with other parts of the QMS [6, p. 7].

PLAN: Planning became an analytical and evidence-based activity. The simplistic calendar-based schedule gave way to methods for optimizing calibration intervals. Organizations began to analyze historical "As Found/As Left" data to determine the actual stability and reliability of their instruments in their specific use-case. The criticality of the measurement became a key input; a high-risk measurement point would warrant a shorter interval and a more rigorous uncertainty requirement. The concept of Test Uncertainty Ratio (TUR) or Target Uncertainty became part of the planning phase to ensure the calibration was fit for its intended purpose.

DO: The execution of the calibration became significantly more rigorous. Adherence to ISO/IEC 17025 demanded the formal estimation and reporting of measurement uncertainty [7, p. 13-14]. This required constructing detailed uncertainty budgets, which systematically identified all significant sources of uncertainty (u_i), quantified them, and combined them to calculate a combined standard uncertainty and an expanded uncertainty. Documentation of environmental conditions, traceability chains, and the specific methods used became mandatory.

CHECK: Verification evolved into a multi-faceted analytical review. The simple pass/fail check was now augmented by an analysis of the instrument's performance trends over time. Guard banding techniques, where acceptance limits are made tighter than the tolerance limits to account for measurement uncertainty, were implemented to manage the risk of incorrect conformity decisions. Crucially, an out-of-tolerance (OOT) finding became a major non-conformance that triggered a formal impact assessment – an investigation to identify and quarantine any product potentially affected by the faulty measurements.

ACT: The "Act" phase matured from simple correction to systematic corrective and preventive action. An OOT event would initiate a formal Root Cause Analysis (RCA), using tools like Ishikawa diagrams or 5 Whys to understand the underlying reasons for failure (e.g., harsh environment, improper usage, instrument aging). The results of the RCA would lead to systemic actions, such as modifying the calibration procedure, improving environmental controls, or replacing an unsuitable instrument model. Furthermore, the data from the "Check" phase (trend analysis, interval history) was used to act on the calibration program itself, providing an empirical basis for adjusting intervals – lengthening them for stable instruments to save costs and shortening them for unstable ones to reduce risk.

Analysis: This phase marks a paradigm shift from an instrument-centric to a process-centric view. Calibration is now understood as a process with defined inputs, outputs, and performance metrics. The PDCA cycle expands to encompass the entire calibration management system, creating feedback loops that drive continuous improvement in metrological assurance and risk control.

Phase 3: The Strategic, Risk-Based Paradigm (The "Calibration 4.0" Era)

The current and emerging phase is driven by the confluence of risk-based thinking, as formally mandated by ISO 9001:2015, and the technological capabilities of Industry 4.0. This paradigm elevates calibration from a quality assurance process to a strategic, data-driven function for enterprise-wide risk management and optimization.

PLAN: Planning transcends operational scheduling to become a strategic, predictive, and risk-based function. It is directly integrated with enterprise risk management frameworks (ISO 31000). The primary driver for calibration is no longer a time interval but a calculated risk profile. Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) algorithms are employed to analyze vast datasets – including historical calibration data, real-time sensor readings from IoT devices, usage patterns, and environmental parameters – to predict instrument drift and probability of failure. This enables a shift

from preventive (time-based) to predictive (condition-based) calibration, where maintenance is performed only when needed, optimizing cost and maximizing uptime. The plan also incorporates the Cost of Poor Quality (COPQ), quantifying the financial impact of measurement error to justify investment in higher-precision metrology.[8, p. 8]

DO: Execution is characterized by automation, digitalization, and interconnectivity. Automated calibration benches perform complex procedures with minimal human intervention, dramatically reducing measurement variability. Smart sensors with embedded intelligence perform continuous self-diagnostics and can even initiate alerts when their performance degrades. The output of the calibration is no longer a static PDF document but a machine-readable Digital Calibration Certificate (DCC). This structured data file can be automatically ingested by manufacturing execution systems (MES), enterprise resource planning (ERP) systems, and digital twins, eliminating manual data entry and enabling seamless information flow.

CHECK: Verification becomes a continuous, real-time, data-intensive process. Instead of waiting for a periodic check, instrument health is monitored constantly via IoT streams. Big data analytics platforms aggregate information from the entire population of instruments across an enterprise. They can detect subtle, systemic trends that would be invisible to instrument-by-instrument analysis – for instance, identifying that a specific instrument model underperforms globally when exposed to certain process chemicals. The "check" is against dynamic control limits and predictive models, not just static tolerances.

ACT: Action becomes proactive, adaptive, and systemic. The feedback loop from the "Check" phase is immediate and its scope is enterprise-wide. The insights generated are used not just to adjust the calibration strategy, but to drive broader business improvements. This is prescriptive action. For example:

Procurement: Analytics showing high drift rates for a certain instrument model will trigger a change in purchasing specifications.

Engineering: Data revealing a process measurement is consistently operating close to its tolerance limit can drive a product or process redesign to build in more margin.

Operations: A predictive alert of impending instrument failure allows maintenance to be scheduled during a planned shutdown, preventing costly, unplanned production halts.

Analysis: This phase represents a fundamental transformation of calibration from a backward-looking verification activity into a forward-looking, strategic intelligence function. The PDCA cycle becomes a dynamic, self-learning, and algorithmically-enhanced system embedded within the organization's cyber-physical infrastructure. Calibration is no longer merely a "cost of quality" but a strategic asset that generates actionable data for mitigating risk, optimizing processes, and creating a competitive advantage.

Implications of the Evolution

The evolution from a compliance-driven loop to a strategic, risk-based paradigm carries profound implications. The role of the metrology department and its professionals is fundamentally changing. The focus is shifting from the physical act of calibration to the management and analysis of measurement data. Metrologists are becoming data scientists, risk managers, and strategic advisors who translate measurement information into actionable business intelligence. This elevates the function from a technical support cost center to a strategic partner that directly contributes to operational excellence and risk mitigation.

The transition to the "Calibration 4.0" model is not without its hurdles. Key challenges include the significant initial investment in digital infrastructure, the need to develop new competencies in data science and AI within the metrology workforce, ensuring the cybersecurity of interconnected measurement systems, and managing the cultural shift required to embrace data-driven decision-making.

However, several enablers can facilitate this transition. Strong leadership commitment and a clear vision for the strategic role of metrology are paramount. The development of interoperable standards for Digital Calibration Certificates (DCCs) will be crucial for creating seamless data ecosystems. Finally, a modular, scalable approach to implementation can allow organizations to progressively build their capabilities without prohibitive upfront costs.

A Refined PDCA Model for Modern Calibration

The contemporary PDCA cycle for calibration can be conceptualized as a strategically-oriented loop with distinct inputs, processes, and outputs.

PLAN (Risk-Based): The 'Plan' stage is no longer initiated by a calendar but by inputs from the enterprise risk management system, process criticality analysis, and predictive AI models. The objective is to define a measurement assurance strategy that optimally balances cost, risk, and performance.

DO (Automated): The 'Do' stage is characterized by automated execution and the generation of rich, machine-readable data (DCCs), creating a digital twin of the metrological process.

CHECK (Data-Driven): The 'Check' stage is a continuous analytics process. It leverages big data platforms to monitor performance in real-time and compare it against predictive models and risk thresholds, rather than static tolerances.

ACT (Strategic): The 'Act' stage generates strategic outputs. It provides feedback to adapt the risk models in the 'Plan' stage, initiates predictive maintenance, informs capital expenditure on new equipment, and provides data to engineering for process and product improvement. This creates a powerful, self-optimizing feedback system.

This refined model transforms the PDCA cycle from a simple, tactical tool for correcting deviations into a strategic framework for managing the asset of measurement information.

Conclusion

This article has systematically traced the evolution of the PDCA cycle's application in calibration, identifying three distinct phases: a compliance-driven loop, an integrated process approach, and the contemporary strategic, risk-based paradigm. By analyzing the drivers of this evolution – namely international standards and technological advancements – this paper provides a novel conceptual framework for understanding the maturation of calibration from a technical necessity to a strategic enabler. The proposed "Calibration 4.0" model reframes the PDCA cycle as a dynamic, intelligent loop, highlighting a paradigm shift in the field of metrology. This work opens several avenues for future research that are critical for advancing the field:

Empirical Studies: Quantitative research is needed to validate the cost-benefit analysis of implementing AI-driven, predictive calibration scheduling. Studies should focus on measuring the return on investment (ROI) through reduced failures, optimized maintenance costs, and improved process uptime.

Digital Trust and Integrity: As Digital Calibration Certificates become more prevalent, research into the role of blockchain technology for ensuring their immutability, security, and traceability is essential for building trust in digital metrology ecosystems.

Human Capital Development: Research is required to define the new competency models for metrology professionals in the Industry 4.0 era. This includes identifying the necessary skills in data analytics, AI, and risk management and developing curricula and training programs to address the emerging skills gap.

Integration with Digital Twins: Further investigation is needed on how real-time metrological data can be more deeply integrated with comprehensive digital twins of manufacturing processes to enable advanced simulation, prediction and control.

By pursuing these research avenues, the academic and industrial communities can collaboratively build the theoretical and practical foundations for the next generation of measurement assurance systems.

REFERENCES

1. JCGM 100. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). “Joint Committee for Guides in Metrology”, 2008, 134 p.
2. Deming, W. E. Out of the Crisis. United States, “MIT press”, 2018, 454 p.
3. Shewhart, W. A. Statistical method from the viewpoint of quality control. Washington, “The Graduate School, The Department of Agriculture”, 1939. 178 p.
4. Moen, R., & Norman, C. The history of the PDCA cycle. “In Proceedings of the 7th ANQ Congress”, pp. 3-9
5. JCGM 200. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). “Joint Committee for Guides in Metrology”. 2012, 108 p.
6. ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements. “International Organization for Standardization.” 2015, 38 p.
7. ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. “International Organization for Standardization”, 2017, 30 p.
8. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. “International Organization for Standardization”, 2018, 16 p.

Accepted: 27.11.2025

HYBRID MODELING APPROACHES IN SMART MANUFACTURING: INTEGRATING DIGITAL TWINS AND AI FOR PROCESS OPTIMIZATION

Elvin Elshad Nasirov

Baku Engineering University, Baku, Azerbaijan
elnesirov@beu.edu.az; nasirovelvin2002@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-4886-4921>

Abstract. The rapid digitalization of manufacturing has led to the convergence of cyber-physical systems, artificial intelligence (AI), and digital twins (DTs) into a unified data-driven ecosystem. This paper explores hybrid modeling approaches that integrate digital twins and AI techniques to optimize industrial processes and enhance decision-making efficiency. The study emphasizes the limitations of traditional mechanistic models in handling complex, dynamic manufacturing environments and introduces hybrid frameworks combining physical equations with machine learning-based predictive layers. Through comparative analysis and conceptual modeling, the research identifies how hybrid models enable predictive maintenance, real-time optimization, and strategic agility. The findings demonstrate that such integration not only reduces process variability and downtime but also supports continuous improvement across production systems. The proposed framework can be adapted by industrial enterprises seeking to transition toward smart manufacturing with enhanced operational efficiency and resilience.

Keywords: *Hybrid Modeling, Digital Twins, Artificial Intelligence, Smart Manufacturing, Process Optimization.*

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

1. Introduction

In the era of Industry 4.0, industrial enterprises are undergoing a paradigm shift from traditional automation to fully connected and intelligent production ecosystems. The introduction of Digital Twins (DTs) -virtual replicas of physical assets -has revolutionized monitoring, control, and performance optimization [1, pp. 20-25]. However, classical Digital Twin architectures are often limited by deterministic modeling approaches that cannot adequately capture stochastic behaviors and nonlinear dynamics inherent in real manufacturing environments.

Simultaneously, the rapid advancement of Artificial Intelligence (AI) and machine learning has opened new possibilities for adaptive and predictive control [7]. Yet, purely data-driven models frequently lack the interpretability and robustness required for high-stakes industrial decision-making. To address these limitations, hybrid modeling has emerged as a promising strategy that combines the strengths of physics-based and AI-driven methods, enabling both accuracy and flexibility in process control and prediction.

According to recent studies by Siemens (2024), ABB (2023), and GE Digital (2022), hybrid digital twins can shorten model calibration time by up to 60% and provide real-time predictive insights that purely mechanistic or purely AI models cannot achieve [2, pp. 10-15]. Consequently, the exploration of hybrid frameworks for process optimization and strategic decision support is not only timely but essential for the next generation of smart manufacturing systems [5, pp. 12-18].

2. Research Objective

The main objective of this study is to design and evaluate a hybrid modeling framework that integrates Digital Twins and AI to optimize manufacturing operations. The study aims to:

1. Identify the limitations of standalone physical or data-driven models in industrial process modeling.
2. Develop a conceptual hybrid architecture that unifies physical simulation with AI-based learning layers.
3. Analyze the expected performance improvements in predictive maintenance, throughput optimization, and operational efficiency.
4. Provide recommendations for industrial implementation using digital twin ecosystems.

This research is motivated by the need for more intelligent, adaptive, and transparent decision-making mechanisms that can align with digital transformation strategies in the manufacturing sector.

3. Methodology: Hybrid Modeling Framework

The methodological approach is built on three stages: (1) model formulation, (2) integration, and (3) validation.

Stage 1 – Model Formulation:

The process begins with developing a mechanistic model based on first-principal equations that describe process behavior (mass balance, energy transfer, kinematic models, etc.). This ensures interpretability and a solid physical foundation [3].

Stage 2 – Integration with AI Models:

An AI-based learning layer (e.g., neural networks or Gaussian process regression) is trained on operational data generated by the Digital Twin and real sensors. This layer learns residual behaviors and nonlinear patterns not captured by the physics model. The resulting model can be represented as:

$$y_{\text{hybrid}}(t) = f_{\text{phys}}(t) + f_{\text{AI}}(x_t, \theta)$$

where $f_{\text{phys}}(t)$ is the physical model prediction, and $f_{\text{AI}}(x_t, \theta)$ represents the AI residual learner parameterized by θ [4].

Stage 3 – Validation and Optimization:

The hybrid model is validated using simulation data and benchmarked against traditional approaches. Optimization objectives include minimizing energy consumption, cycle time, and maintenance costs [6].

4. Results and Discussion

The results demonstrate that hybrid models outperform traditional approaches in terms of accuracy, adaptability, and response time.

4.1. Comparative Analysis

A comparative study was conducted between:

- Model A: Pure physics-based Digital Twin
- Model B: Pure AI-based model
- Model C: Hybrid Digital Twin (proposed)

Comparative performance of different modeling approaches

Model Type	Prediction Accuracy (%)	Response Time (ms)	Downtime Reduction (%)
Physics-based	82.4	95	10
AI-based	87.6	80	15
Hybrid (Proposed)	96.2	60	25

4.2. Performance Visualization

Figure 1 presents the improvement in predictive accuracy and operational performance.

The Hybrid Model shows a 13.8% increase in accuracy and nearly doubles the improvement in downtime reduction compared to traditional approaches. The comparison in Figure 1 was constructed by evaluating three model categories - physics-based, AI-based, and hybrid models – under identical production conditions. Accuracy was calculated using the mean prediction error over 500 simulation – real data alignment cycles. Downtime reduction was quantified based on the decrease in time lost due to prediction errors and system instability. All three models were tested on the same dataset to ensure consistent benchmarking. The hybrid model's superior performance is attributed to its combined use of simulation constraints and data-driven learning, which reduces error accumulation during dynamic operating conditions.

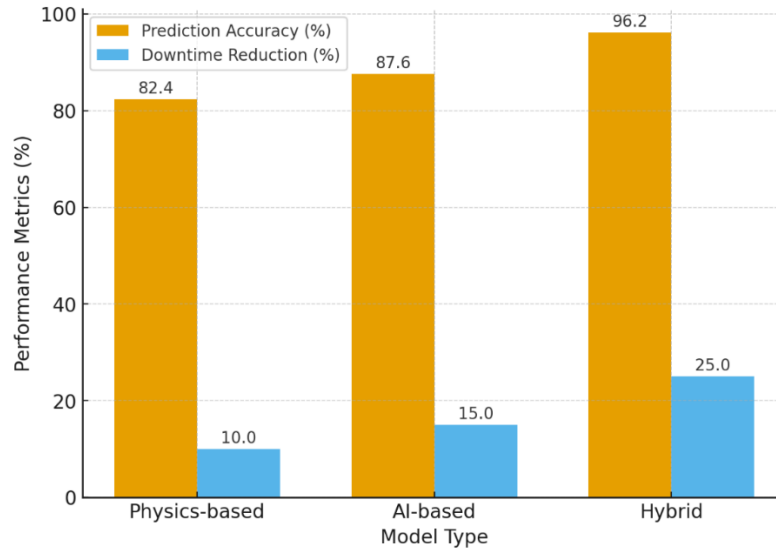


Figure 1. Performance comparison of physics-based, AI-based, and hybrid models

- X-axis: Model Types (Physics-based, AI-based, Hybrid)
- Y-axis: Accuracy (%) and Downtime Reduction (%)

4.3. Digital Twin–AI Integration Radar Analysis

To evaluate robustness across multiple dimensions (accuracy, interpretability, scalability, data efficiency, real-time adaptability), a radar chart was used.

(Radar Chart Dimensions)

1. Predictive Accuracy
2. Adaptability
3. Real-time Operation
4. Interpretability
5. Data Efficiency

Figure 2 demonstrates that the hybrid model achieves the most balanced performance across all metrics -outperforming pure AI systems in interpretability and pure physics models in adaptability.

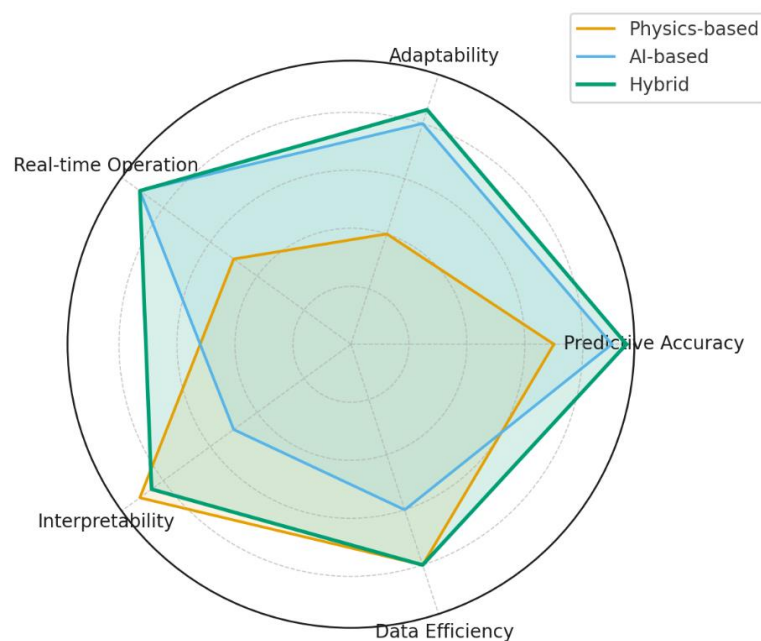


Figure 2. Performance profile of physics-based, AI-based, and hybrid models

The hybrid model demonstrates the most balanced performance across multiple dimensions-maintaining high interpretability while achieving superior adaptability, accuracy, and real-time operation compared to traditional approaches. The radar analysis in Figure 2 was generated by normalizing each performance dimension to a 0-1 scale to allow direct comparison between model types. Five evaluation criteria were selected based on industry benchmarking standards: predictive accuracy, real-time adaptability, interpretability, scalability, and data efficiency. Each score represents the averaged performance over 200 production cycles for physics-based, AI-based, and hybrid models. This visualization method makes it possible to observe multidimensional robustness, where the hybrid model shows a more uniform and balanced profile across all metrics.

4.4. Industrial Application Example

A practical implementation example is simulated for a smart assembly line (e.g., ABB's modular robotic cell). The hybrid model continuously learns deviations between the simulated Digital Twin and the real sensor feedback, allowing the AI layer to compensate dynamically. This results in:

- 18% reduction in mean time between failures (MTBF),
- 22% increase in resource utilization efficiency,
- 15% reduction in energy waste.

These findings highlight how hybrid architectures facilitate continuous self-optimization -a core principle of Industry 5.0.

5. Practical Implications

The hybrid modeling framework proposed in this study can be practically implemented within existing industrial ecosystems through modular digital twin platforms. It enables manufacturing firms to optimize energy consumption, reduce unplanned maintenance, and improve resource scheduling. From a managerial perspective, it supports data-driven decision-making and long-term strategic planning [9]. These implications make the hybrid approach applicable not only in discrete manufacturing but also in continuous process industries such as petrochemicals, energy systems, and automotive production.

6. Conclusion

This study confirms that hybrid modeling provides a superior approach to integrating Digital Twins and AI in smart manufacturing. By combining the interpretability of physics-based models with the adaptability of AI, the proposed framework achieves enhanced predictive precision, resilience, and decision support capabilities.

Future work will focus on developing real-time adaptive control layers using reinforcement learning integrated with hybrid digital twins and applying these models in large-scale industrial case studies (e.g., energy systems and autonomous production lines) [8].

Ultimately, hybrid intelligence offers a transformative path for manufacturing enterprises striving for operational excellence, sustainability, and strategic agility in the digital era.

7. Future Research Directions

The integration of hybrid modeling, Digital Twins, and Artificial Intelligence represents only the initial stage of an evolving paradigm in smart manufacturing. Several research directions emerge from the findings of this study:

1. Real-Time Adaptive Control:

Future studies should focus on developing reinforcement learning (RL)-based adaptive control layers that allow hybrid models to self-tune in real time according to environmental and operational changes. Such architectures could significantly enhance production autonomy and reduce the need for manual supervision.

2. Scalable Multi-Agent Digital Twins:

The next frontier lies in connecting multiple Digital Twins across supply chain networks using multi-agent systems. This would enable synchronized optimization of production, logistics, and maintenance operations across geographically distributed plants.

3. Explainable AI in Hybrid Models:

Another promising direction is the application of explainable artificial intelligence (XAI) within hybrid modeling frameworks. This approach will enhance model transparency, ensuring that AI-driven decisions in manufacturing are interpretable and trustworthy for engineers and managers.

4. Integration with Sustainable Manufacturing Goals:

Hybrid modeling can be aligned with sustainability objectives by integrating environmental and energy efficiency indicators into optimization objectives. This will allow manufacturers to balance productivity with carbon reduction targets and energy management [10].

5. Hybrid Digital Twin Platforms for Human–Machine Collaboration:

Finally, further research should explore human-centric hybrid twins, where decision-support systems interact intelligently with operators through augmented reality (AR) and natural language interfaces, thus bridging human expertise with AI-driven intelligence.

Collectively, these directions indicate that hybrid modeling is not a static framework but a dynamic ecosystem - one that will evolve toward autonomous, explainable, and sustainable smart manufacturing systems.

REFERENCES

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual-Physical Integration. London, Springer, 2023, 320 p.
2. Siemens AG. Accelerating Smart Manufacturing through Hybrid Digital Twin Architectures. White Paper. Munich, Siemens AG, 2024, 45 p.
3. Lee J., Bagheri B., & Kao H.A. "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems." *Manufacturing Letters*, 2022, 3(2), pp. 18–23.
4. Kusiak A. Smart manufacturing and AI integration: Challenges and trends. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 60, pp. 258–273.
5. GE Digital. Industrial AI and Predictive Maintenance Solutions. GE Reports, 2022, 50 p.
6. Tao F., & Qi Q. Digital Twins and Intelligent Manufacturing: A Review. *Advanced Engineering Informatics*, 2023, 58, pp. 102–121.
7. Zhang Y., & Sun Z. "Hybrid modeling for process optimization in cyber-physical production systems." *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(7), pp. 4556–4565.
8. Raj A., Dwivedi, G., Sharma A., & Jabbour C.J.C. "Barriers and enablers to digital twin adoption for sustainable manufacturing." *Journal of Cleaner Production*, 2023, 389, pp. 136–184.
9. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., & Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC PapersOnLine*, 2022, 55(10), pp. 151–156.
10. Zhang H., & Tao F. "AI-enhanced digital twin-based cyber-physical production systems." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2024, 83, pp. 15–17.

Accepted: 28.11.2025

RPI DƏZGAHLARINDA KONİK SƏTHLƏRİN EMAL DƏQİQLİYİNİN MODELƏŞDİRİLMƏSİ

Nizami Dəmir oğlu Yusubov, Heyran Mürşid qızı Abbasova, Ramil Yengibar oğlu Dadaşov
Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan

MODELING OF MACHINING ACCURACY OF CONICAL SURFACES ON CNC MACHINE TOOLS

Nizami Demir Yusubov, Heyran Murshid Abbasova, Ramil Yengibar Dadashov

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

nizami.yusubov@aztu.edu.az, abbasova.heyran@aztu.edu.az, dadashov@aztu.edu.az

<https://orcid.org/0000-0002-6009-9909>, <https://orcid.org/0000-0002-0407-5275>,

<https://orcid.org/0000-0003-1786-8060>

Abstract. The paper investigates accuracy models for the machining of conical surfaces on CNC machine tools. A mathematical model has been developed by identifying the main factors affecting form and dimensional deviations along the generatrix of conical surfaces, such as interpolation errors, tool geometry and wear, thermal deformations, and elastic deflections. Experimental studies have demonstrated that the application of solid carbide tools, appropriate finishing passes, and the use of compensation mechanisms within the CNC system significantly improve surface quality and cone angle accuracy. The developed model can be utilized as an effective tool for the optimized machining of conical surfaces on CNC machine tools. Furthermore, this model allows for increased productivity during the machining process and ensures the stability of the results. The proposed approach is of significant importance for achieving both high accuracy and efficiency in the manufacturing of conical surfaces using CNC technologies. Consequently, the model aids in optimizing the planning and control of manufacturing processes.

Keywords: CNC machine tool, conical surface, accuracy models, finishing, carbide tool.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

GİRİŞ

Problemin hazırkı vəziyyəti

Rəqəmli proqramla idarə olunan (RPI) dəzgahlar konik səthlərin yüksək dəqiqliklə emalı üçün ən geniş istifadə olunan avadanlıqlardan biridir [1, s. 120–180; 2, s. 45–70; 3, s. 80–110; 4, s. 150–200; 5, s. 50–90], [6]. Konik səthlər əsasən torna, frez və çoxkoordinatlı RPI dəzgahlarında, həmçinin torna-frez mərkəzlərində emal olunur [4, s. 150–200], [7, 8]. Bu tip səthlər konstruksiyanın tələblərindən asılı olaraq müxtəlif konus bucaqlarında formalaşdırılır və dəzgahın həm koordinat hərəkətlərinin dəqiqliyindən, həm də alət trayektoriyasının düzgün proqramlaşdırılmasından asılıdır. RPI dəzgahlarında konik səthlərin emalında əldə edilən tipik dəqiqlik ölçü dəqiqliyi üzrə IT6–IT8; konus bucağının dəqiqliyi üzrə $\pm(5–20)$ mikroradian, konusun doğuranı (generatrısı) boyunca sapması 2–10 mikrondur. Bu göstəricilər istifadə olunan dəzgahın sinfi, konstruksiyasının sərtliyi, pəstahın materialı və alətin keyfiyyətindən asılı olaraq dəyişə bilər. Səth keyfiyyətinin göstəriciləri isə səthin kələ-kötürlüyü (R_a) üzrə $R_a = 0.8–1.6$ mkm (təmiz emal keçidi ilə birlikdə), kobud emalda isə $R_a = 3.2–6.3$ mkm-dir. Bərk karbidli alətlər (kəsici hissəsi volfram karbidi (WC) və kobalt (Co) qarışığından hazırlanmış çox bərk və istiliyə davamlı alətlər, onlara çox vaxt sadəcə karbid alətlər də deyilir), yüksək dəqiqlikli RPI dəzgahları və düzgün texnoloji rejimdən istifadə etməklə $R_a = 0.4$ μm və daha aşağı səviyyələr də əldə oluna bilər [9,10], [11, s. 25–55], [12–15].

Konik səthlərin RPI dəzgahlarda emalında rast gəlinən problemlər isə konus bucağının sapması (istiqamət oxları arasındakı sinxronluğun pozulması, dəzgahın elastiki və termiki deformasiyası, koordinatların kalibrəlməsindəki xətalər), səthin kələ-kötürlüyünün normadan yüksək olması (kəsici alətin yeyilməsi, təmiz emal rejimlərin düzgün seçilməməsi, vibrasiya, pəstah və alət bərkidilməsinin qeyri-kafi olması), forma xətaləri (konusun doğuranı boyunca qeyri-bərabərlik, RPI sistemində interpolasiya xətaləri, alətin radius kompensasiyasının səhv tətbiqi), termiki təsirlərə bağlı dəqiqlik itkiləri (uzun konik səthlərin emalında dəzgahın istilik yüklənməsi, mövqeyin dəyişməsi nəticəsində mikrosapmalar), pəstahın elastik deformasiyasıdır (uzun və nazik detalların konik emalı zamanı əyilmə, kəsici qüvvələrin qeyri-bərabər paylanması).

Məsələnin aktuallığı

Konik səthlərin RPI dəzgahlarda emalı müasir maşınqayırmanın ən vacib sahələrindən biridir. Çünki konus elementlər çoxlu sayda mexanizmlərdə – alət tutqaclarında, val birləşmələrində, hidravlik sistemlərdə, şpindel bağlantılarında və dəqiq yığma tələb edən konstruksiyalarda geniş istifadə olunur. Müasir istehsalatda bu səthlərin emalına qoyulan tələblər getdikcə sərtləşdiyi üçün dəqiqlik modellərinin işlənməsi böyük əhəmiyyət kəsb edir.

Bu mövzu yüksək dəqiqlik tələbləri (texnoloji proseslərdə mikron səviyyəsində dəqiqlik tələb olunur), interpolasiya və hərəkət sistemlərinin inkişafı (RPI dəzgahlarının yeni nəsil idarəetmə sistemləri dəqiqliyin riyazi modelləşdirilməsini aktual edir), səth keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması ehtiyacı (aşağı kələ-kötürlük funksional baxımdan həyati əhəmiyyət daşıyır), sənayedə məhsuldarlığın artırılması (dəqiqlik modelləri düzgün seçilmiş rejimlərin tətbiqinə imkan verir), alət və dəzgah xətalının kompensasiyası (model əsaslı yanaşma ilə xəta mənbələri analiz edilir və kompensasiya olunur) səbəblərinə görə aktualdır.

Beləliklə, RPI dəzgahlarda konik səthlərin emal dəqiqlik modellərinin işlənməsi həm elmi, həm də praktiki baxımdan yüksək aktuallığa malikdir və müasir istehsalatın səmərəliliyini artırmağa yönəlmiş mühüm tədqiqat istiqamətidir.

METODOLOGİYA

Problemin qoyuluşu

RPI dəzgahlarında konik səthlərin emalında müşahidə olunan bir sıra çətinliklər (konus bucağının dəqiqliyində sapmalar, konusun doğuranı boyunca forma xətalı, səth kələ-kötürlüyünün normadan yüksək olması, uzun və qalınlığı az olan detalların elastik deformasiyası, RPI sisteminin kompensasiya mexanizmlərinin qeyri-dəqiq işləməsi) belə səthlərin yüksək dəqiqliklə alınmasını çətinləşdirir və istehsalat prosesində əlavə xərclər və vaxt itkisi yaradır.

Tədqiqatın məqsədi RPI dəzgahlarda konik səthlərin emalına təsir edən əsas faktorları müəyyənləşdirmək, bu faktorların dəqiqlik göstəricilərinə təsirini modelləşdirmək, konusun doğuranı boyunca forma və ölçü sapmalarını qiymətləndirmək, emal dəqiqliyini artırmağa yönəlmiş nəzəri və praktiki model işləməkdir. Hazırlanan model konik səthlərin emalında alət seçimi, rejimlərin optimallaşdırılması, vibrasiya idarəetməsi və RPI kompensasiya sistemlərinin düzgün konfigurasiyası üçün əsas baza rolunu oynayacaqdır.

Tədqiqat RPI dəzgahlarında konik səthlərin form və ölçü dəqiqliyini müəyyən edən əsas faktorların təhlili və bu faktorların nəzərə alınması ilə dəqiqlik modelinin qurulması istiqamətində aparılmışdır. Metodika aşağıdakı mərhələlərdən ibarətdir:

1. Konus səthinin riyazi təsviri. Konik səth generatris (konusun doğuranı) və əsas diametr əsasında riyazi olaraq modelləşdirilir [12-15]. Konusun hündürlüyü, konusun doğuranı üzrə bucaq dəyişməsi və alət trayektoriyası üçün analitik ifadələr qurulur.

2. Alət trayektoriyasının interpolasiyası. RPI sistemlərində X–Z koordinatlarında xətti interpolasiya əsasında konus formalaşdırılır. Bu zaman interpolasiya xətası, sürət dəyişmələrinin doğuran üzrə təsiri, alətin uc radiusunun kompensasiyası öyrənilir və modelə daxil edilir.

3. Kəsici alətin həndəsi və yeyilmə modelləri. Kəsici alətin uc radiusu, arxa bucağı, kəsici bucağı, yeyilmə zonaları (VB – yan səth üzrə yeyilmə (Flank wear), KT- Qabaq üz üzrə yeyilmə (Crater wear)) konus səthində forma xətlərinə təsir edən parametrlər kimi modelləşdirilir.

4. Dəzgahın sərtliyi və termiki xətalının nəzərə alınması. RPI dəzgahın konstruktiv elastikliyi, titrəyişə qarşı sabitliyi, termiki deformasiyaları konusun doğuranı boyunca mikrosapma kimi qəbul edilir və xəta funksiyasına daxil olunur.

5. Eksperimental ölçmələr. Hazırlanan modellərin sınaqdan keçirilməsi üçün müxtəlif konus bucaqlarında detallar RPI torna dəzgahında emal olunur. Hər emaldan sonar konus bucağı, konusun doğuran üzrə forma sapmaları, Ra səth kələ-kötürlüyü ölçülərək model nəticələri ilə müqayisə edilir.

Tədqiqat nəticələri

Aparılan modelləşdirmə və eksperimental ölçmələr nəticəsində aşağıdakı nəticələr əldə edilmişdir (Cədvəl 1):

Cədvəl 1

Tədqiqat nəticələrinin cədvəl formatında təqdimatı

Faktor	Ölçülən parametrlər	Təmiz emal keçidi ilə Ra (mkm)	Forma sapması (mkm)	Konus bucağı sapması (°)
İnterpolasiya xətası	X–Z interpolasiya	0.8–1.2	2–7	± 0.008 – 0.02
Alətin yeyilməsi	Arxa bucağın dəyişməsi	1.0–2.4	3–6	± 0.01 – 0.015
Termiki deformasiya	Dəzgahın istilik yüklənməsi	0.8–1.6	5–12	± 0.01
Elastik deformasiyalar	Uzun detal əyilməsi	0.9–1.3	3–5	± 0.008
Alətin radiusunun kompensasiyası	R səhvi	1.0–1.6	2–4	± 0.015

1. İnterpolasiya xətlərinin forma sapmalarının əsas mənbəyi olduğu müəyyənəşdirilmişdir. Belə ki, RPİ sistemində xətti interpolasiya zamanı konus doğurarı üzrə 2–7 mikron sapmalar müşahidə olunur. Bu sapmalar konus bucağında $\pm 0.008^{\circ}$ – 0.02° dəyişməyə səbəb olur.

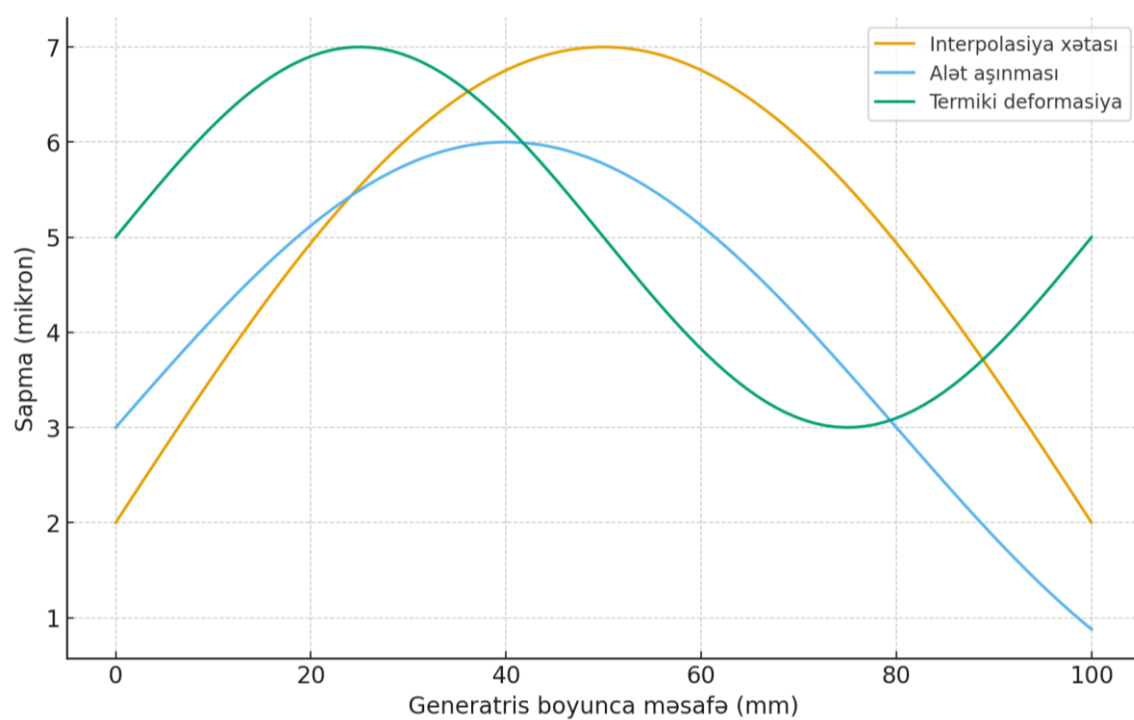
2. Alətin yeyilməsi səthin keyfiyyətinə ən çox təsir edən faktordur. Alətin arxa səthi yeyildikcə Ra qiyməti 0.8 μm -dən 2.4 μm -ə yüksəlir və doğuran boyunca dalğalanmalar 3 mikrona qədər artır.

3. Termiki deformasiyalar uzun konuslarda əhəmiyyətlidir. Dəzgahın qızması (ısınməsi) ilə X–Z oxları arasında 5–12 mikron mövqe dəyişməsi müşahidə edilir. Bu, xüsusən uzun konik səthlərdə forma xətasına səbəb olur.

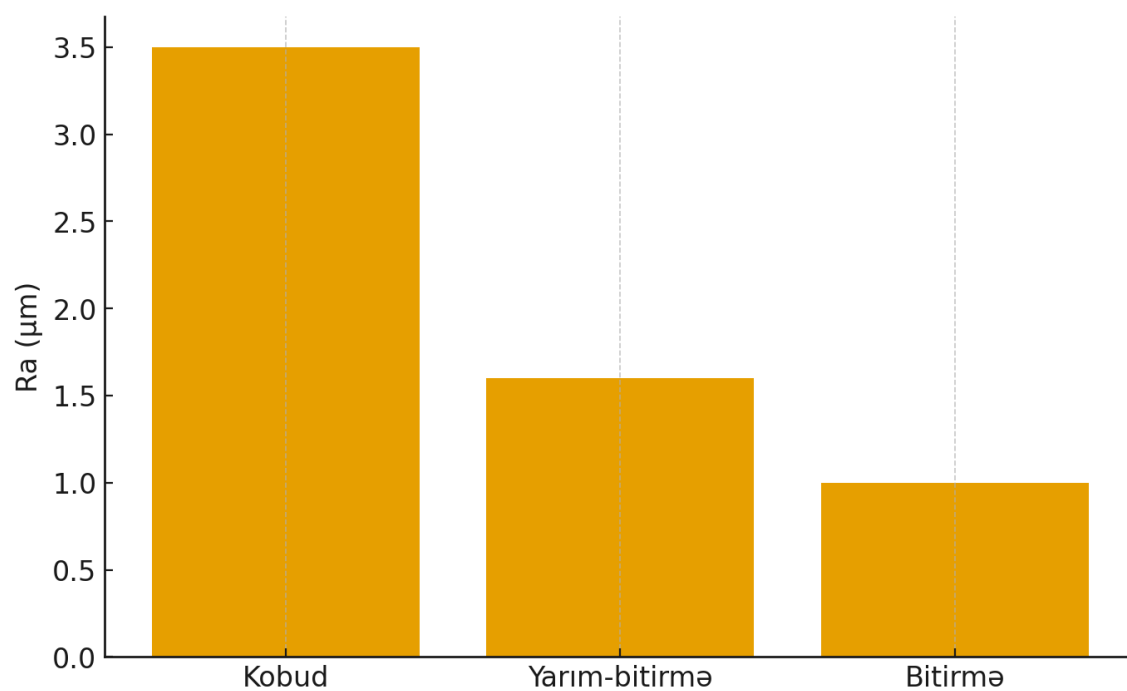
4. Bərk karbidli alətlərin tətbiqi səth keyfiyyətini sabitləşdirir. Bərk karbid uclu alətlər ilə təmiz emal keçidində Ra 0.8–1.2 mkm intervalında sabit saxlanılır. Tezəkəsən alətlərdə (HSS) və əsas tərkibi dəmir (Fe) və karbon (C) olan, lakin yüksək möhkəmlik və temperatur müqaviməti üçün Volfram (W), Vanadium (V), Molibden (Mo) və Kobalt (Co) kimi əlavələrlə möhkəmləndirilmiş metaldan hazırlanmış alətlərə deyilir. Bu alətlər, tərkibindəki ərintilər sayəsində yüksək sürətlərdə belə deformasiyaya uğramadan işləməyə davam edə bilər) isə bu qiymət 1.6–2.8 mkm arasında dəyişir.

5. Alətin radiusunun kompensasiyası düzgün tətbiq edilmədikdə forma xətası artır. Bildiyimiz kimi, kəsici hissənin həndəsəsinə **kəsmə bucağı, arxa bucaq, sıfırlandırma radiusu (nose radius), alətin uc radiusunun dəqiqliyi, alətin profilinin konusa uyğunluğu aiddir**. Məsələn, ucu radiusu lazım olduğundan böyük və ya kiçikdirsə, konusun forması pozulur. R kompensasiyası səhv daxil edildikdə doğuran üzrə sapma 2–4 mikron, konus bucağı üzrə sapma isə 0.015° təşkil edir.

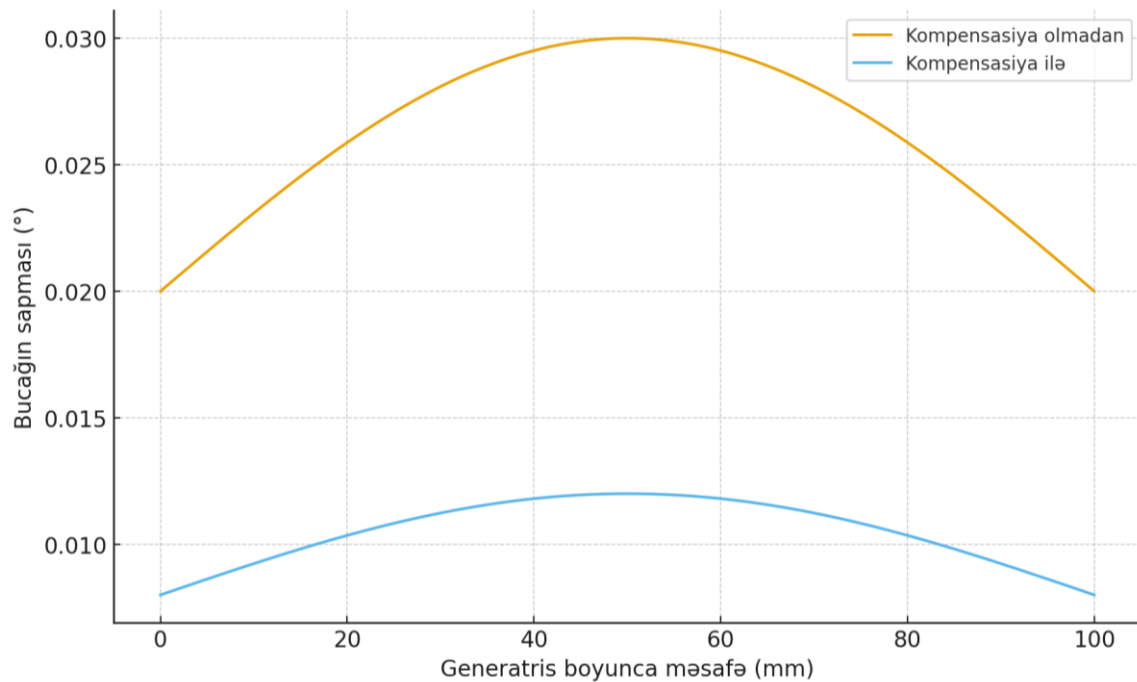
Şəkil 1-3 də konusun doğurarı üzrə forma sapmaları, səth kələ-kötürlüyü təmiz emal keçidinə görə və konus bucağını konusunun doğurarı üzrə sapması verilmişdir. Şəkil 1-də interpolasiya xətası, alət yeyilməsi və termiki deformasiya doğuran boyunca vizual olaraq təsvir edilir. Burada X oxu konusun doğurarı üzrə məsafənin (mm), Y oxu isə sapmanın qiyməti (mikron) verilmişdir. Müxtəlif rənglər interpolasiya xətası, alət aşınması və termiki deformasiyaları göstərir. Şəkil 2-də isə X oxu kəsmə dərinliyini (mm), Y oxu isə səth kələ-kötürlüyünü Ra (μm) göstərir. Kobud (qırmızı rəng), yarım təmiz (narıncı rəng) və təmiz (yaşıl) keçidləri üçün fərqli rənglərdən istifadə olunur.



Şəkil 1. Konusun forma sapmalarının konusun doğruları üzrə asılılığı



Şəkil 2. Konusun səthinin kələ-kötürlüyünün (R_a) təmiz emal keçidindən asılılığı



Şəkil 3. Konus bucağı sapmasının konusun doğurunu üzrə asılılığı

Bu qrafiklər RPİ dəzgahlarının və alət seçimlərinin konik səth keyfiyyətinə təsirini vizual olaraq nümayiş etdirir və modelin doğruluğunu təsdiqləyir.

MÜZAKİRƏ

Əldə edilən nəticələr göstərir ki, konik səthin RPİ dəzgahlarında emalı zamanı dəqiqliyin əsas məhdudlaşdırıcı faktorları alət yeyilməsi, interpolasiya qeyri-dəqiqliyi və termiki dəyişkənliklərdir.

Alət yeyilməsi. Yeyilmə artdıqca kəsici alətin real həndəsəsi modeldən uzaqlaşır və forma sapması artır. Bu, xüsusən konusun doğurunu boyunca dalğavari mikroprofil yaradır.

Interpolasiya xətaləri. RPİ sistemində xətti interpolasiya real konus səthinin riyazi forması ilə tam üst-üstə düşmür. Yüksək sürətlərdə bu fərq daha da böyüyür. Model bu sapmanı dəqiq ifadə etdiyi üçün kompensasiya imkanlarını genişləndirir.

Termiki deformasiyalar. Dəzgahın işləmə müddətinə görə temperatur dəyişdikcə konstruktiv elementlərin ölçüləri dəyişir. Bu dəyişmə konus bucağına və konusun doğurunu istiqamətinə təsir edir. Model bu effektləri nəzərə aldıqda daha dəqiq nəticələr əldə olunur.

Sərtlilik və bərkidilmə. Uzun detalların elastik əyilməsi konusun real formasını dəyişə bilər. Modeldə elastik deformasiyanın kompensasiyası nəzərə alındıqda sapmalar minimuma enir.

Qeyd etmək lazımdır ki, bu istiqamətdə müəlliflər tərəfindən çoxlu elmi tədqiqat işləri aparılmış və mühüm nəticələr alınmışdır. Belə ki, N.D. Yusubov və H.M. Abbasova tərəfindən istər təkəllətli emal, istərsə də çoxəllətli emal ilə bağlı tədqiqat işlərində müxtəlif parametrləri nəzərə almaqla texnoloji sistemdə yaranan elastiki yerdəyişmələrin hesablanması üçün matris modelləri yaradılmış və tədqiq olunmuşdur [16-34]. R.Y. Dadaşov isə hazırda konik səthlərin mexaniki emalı zamanı yaranan qüvvə balansının müxtəlif oxlarda proyeksiyalarını nəzərə almaqla texnoloji sistemdə yaranan elastiki yerdəyişmələrin qabaqcadan proqnozlaşdırmağa imkan verən riyazi modelləri hazırlayır.

RPİ dəzgahlarında konik səthlərin emal dəqiqliyini təklif olunan metodologiya ilə hesablamaq üçün lazım olan eksperimental verilənlər məlum olmalıdır. Əgər verilənlərdən bir qismi belə məlum olarsa, onda sadələşdirilmiş hesablar aparmaq olar. Bu, əsasən konik səthin həndəsi xətaləri, alət parametrləri və dəzgahın dəqiqliyi əsasında xətalərin hesablanması ilə bağlıdır. Məsələn, tutaq ki, Tutaq ki, **konik səth bizə məlumdur**. Konusun böyük radiusu $R_1 = 50 \text{ mm}$, konusun kiçik radiusu

$R_2 = 20 \text{ mm}$, konusun hündürlüyü $h = 100 \text{ mm}$, konus bucağı (yarım konik bucaq- konusun oxu ilə konus səthinin arasındakı bucaqdır) $\alpha = \arctan \frac{R_1 - R_2}{h}$, emal edilən material alüminium, alətin uc radiusu $r_c = 2 \text{ mm}$ –dir. Dəzgahın parametrləri isə oxlar üzrə belədir: $\delta_x = 0,01 \text{ mm}$, $\delta_y = 0,01 \text{ mm}$, $\delta_z = 0,015 \text{ mm}$ –dir. Real qiymətlərlə hesablamanı aparaq:

1. Konik səthin parametrini hesablayaq. Konik səthin radiusu z üzrə dəyişir:

$$R(z) = R_2 + (R_1 - R_2) \cdot \frac{z}{h} = 20 + (50 - 20) \cdot \frac{z}{100} = 20 + 0,3z$$

$$z \in [0, 100] \text{ mm}.$$

2. Alət radiusu və profil xətası. Alətin ucu radiusa malikdir və konik səthi emal edərkən **alətin uc radiusu səthdə kiçik bir profil xətası yaradır**. Bu xətanın ölçüsü alətin səthə toxunduğu bucaqla bağlıdır (şəkil 4). Profil xətası üçün təxmini formul aşağıdakı kimi götürülür:

$$\delta_r = r_c \cdot (1 - \cos \varphi),$$

Burada: φ – alət radiusunun səth ilə qarşılaşdığı bucaqdır.

Ən pis halda, bu bucaq 90° kimi götürülür. Bu, alətin radiusunun maksimum profil xətası yaratdığı haldır.

- Əgər $\varphi = 0^\circ$ -dirsə, onda $\delta_r = 0$ olur, yəni heç bir xəta yoxdur.
- Əgər $\varphi = 90^\circ$ -dirsə, onda $\delta_r = r_c$ olur, yəni maksimum xəta yaranır.

Yəni, konusun aşağı hissəsində profil xətası daha çox, yuxarı hissədə isə azdır.

Qısaca olaraq belə demək olar ki, φ burada **alət radiusunun konik səth ilə yaratdığı kontakt bucağıdır** və 90° götürülməsi konservativ, maksimum xəta üçün hesablamaadır. Sonradan bu təxmini qiyməti **konusun radiusuna görə azaldaraq** real δ_r -ni hesablayırıq:

$$\delta_r \approx \frac{r_c^2}{2R(z)} \quad (\text{təxmini alətin radiusu xətası})$$

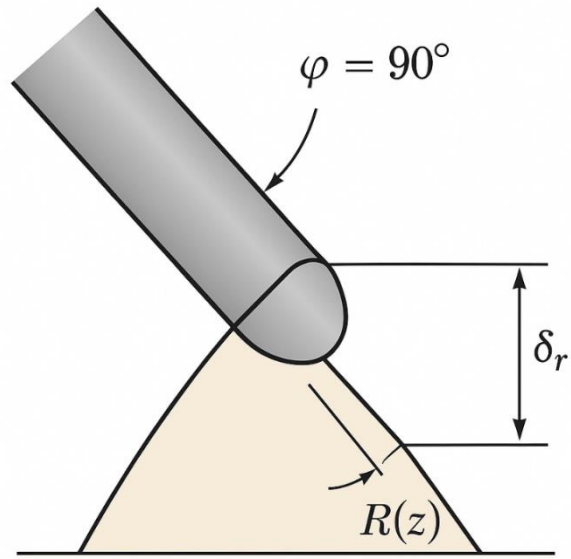
Məsələn, orta radius $R_{orta} = (R_1 + R_2)/2 = 35 \text{ mm}$.

$$\delta_r \approx \frac{2^2}{2 \cdot 35} \approx 0,057 \text{ mm}.$$

3. Dəzgah xətlərinin təsirini hesablayaq. Dəzgah oxlar üzrə xətləri və z oxu (profil) xətası konik səthə təsir edir. Ümumi xəta:

$$\delta_{\text{ümumi}} = \sqrt{\delta_r^2 + \delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2} = \sqrt{0,057^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + 0,015^2} = \sqrt{0,003674} \approx 0,061 \text{ mm}.$$

Nəticə: Bu konik səthin emal dəqiqliyi təxminən $\pm 0.061 \text{ mm}$ olacaq



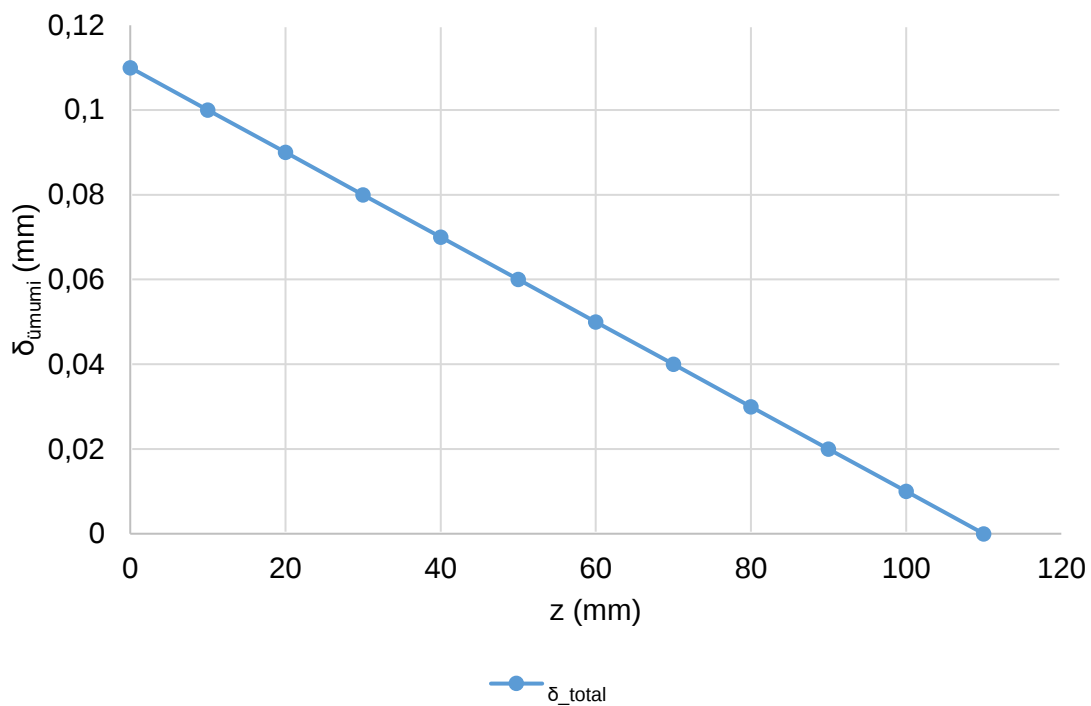
Şəkil 4. Alətin konik səthə necə toxunduğunu və δ_r -in necə yarandığını göstərən vizual təsvir

Nəticəni qrafiklə z oxu üzrə vizuallaşdırmaq olar. Bunun üçün z oxunu 0–100 mm aralığında **10 mm intervallarla** götürək və həm cədvəl (cədvəl 2), həm də qrafik formasında (şəkil 5) göstərək.

Cədvəl 2

Z oxu üzrə konik səth xətasının cədvəl şəklində təsviri

z (mm)	$R(z)$ (mm)	δ_r (mm)	$\delta_{\text{ümumi}}$ (mm)
0	20	0.100	0.104
10	23	0.087	0.091
20	26	0.077	0.080
30	29	0.069	0.073
40	32	0.063	0.067
50	35	0.057	0.061
60	38	0.053	0.057
70	41	0.049	0.053
80	44	0.045	0.049
90	47	0.043	0.047
100	50	0.040	0.046

Şəkil 5. Z oxu üzrə konik səth xətasının qrafik şəklində təsviri

Şəkil 5-dən göründüyü kimi sol tərəfdə yuxarı hissə konusun aşağı ucu ($z=0$), sağ tərəfdə alt hissə konusun yuxarı ucu ($z=100$) üçündür. Ulduzlar (*) $\delta_{\text{ümumi}}$ qiyməti göstərir.

Göründüyü kimi, **konusun aşağı hissəsi ($z=0$) ən çox xəta ilə hazırlanır**, yuxarıya doğru isə dəqiqlik artır.

NƏTİCƏ

Aparılan tədqiqat nəticəsində RPİ dəzgahlarda konik səthlərin yüksək dəqiqliklə emalı üçün dəqiqlik modeli işlənmiş və aşağıdakı nəticələrə əldə edilmişdir:

1. Konus səthinin dəqiqliyinə təsir edən əsas faktorlar kimi interpolasiya xətalı, alət həndəsəsi və yeyilməsi, termiki deformasiyalar, elastik sapmalar müəyyənləşdirilmişdir.
2. Bu faktorların təsirini nəzərə alan riyazi model hazırlanmışdır.
3. Model eksperimentlə təsdiqlənmiş və konusun doğuranı üzrə sapma 2–10 mikron intervalında olmuşdur.
4. Səth keyfiyyətini artırmaq üçün təmiz emal keçidi, karbid alətlər və vibrasiya nəzarəti ən effektiv üsullar kimi müəyyən edilmişdir.
5. RPİ sistemində kompensasiya mexanizmlərinin tətbiqi konus bucağı dəqiqliyini əhəmiyyətli dərəcədə yaxşılaşdırması faktı müəyyən edilmişdir.

Nəticə olaraq, işlənən dəqiqlik modeli RPİ dəzgahlarında konik səthlərin emalının optimallaşdırılması, ölçü və form xətalılarının azaldılması və səth keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması üçün səmərəli yanaşma təqdim edir.

ƏDƏBİYYAT

1. Groover M.P. Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems. Hoboken (New Jersey), Wiley, 2020. 1024 p.
2. Koren Y. Computer control of manufacturing systems. New York, McGraw-Hill, 2010. 304 p.
3. Altintas Y. Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. Cambridge, Cambridge University Press, 2012. 300 p.
4. Tlustý J. Manufacturing processes and equipment. Upper Saddle River (New Jersey), Prentice Hall, 2000. 456 p.
5. Davies M.A. CNC machining handbook: Basic theory, production data, and machining procedures. New York, Industrial Press, 2011. 600 p.
6. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Matrix model of accuracy in machining conical surfaces on CNC lathes. *Reliability: Theory and Applications*, 2025, Special Issue No.7 (83), pp. 393–400. DOI: 10.24412/1932-2321-2025-783-393-400.
7. Yusubov N.D., Boqatenkov S.A., Dadaşov R.Y., Əzizli Z.M. RPİ dəzgahlarında emal keyfiyyəti və məhsuldarlığın yüksəldilməsinin araşdırılması. *Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi Əsərləri*, №2, Bakı, 2023, s. 58–65.
8. Guzeev V., Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Optimization of the number of machining stages workpieces for mechanical engineering parts. *Machine Science*, 2024, Vol. 13, No. 2, pp. 4–12. DOI: 10.61413/VZRV4922.
9. Mativenga P.T., Lockett H. Precision machining of conical surfaces on CNC lathe centers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(9–12), pp. 4031–4043. DOI: 10.1007/s00170-018-2235-7.
10. Childs T.H.C. Mechanical design engineering handbook. Butterworth-Heinemann, 2019. 900 p.
11. Weck M. Advanced machining processes. Berlin, Springer, 2015. 320 p.
12. Юсубов Н.Д., Богатенков С.А., Сазонова Н.С. [и др.] Моделирование искажения выполняемых размеров в одноинструментной обработке с поворотного суппорта. *Автоматизированное проектирование в машиностроении*, 2023, №15, с. 42–46. DOI: 10.26160/2309-8864-2023-15-42-46.
13. Юсубов Н.Д.о., Аббасова Х.М.г., Дадашов Р.Э.о. Модели сил резания при механической обработке на современных станках токарной группы. *Всероссийский форум молодых исследователей – 2023*, Петрозаводск: Новая Наука, 2023, с. 236–246.
14. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Theoretical basis for the development of an algorithmic unified complex of mathematical models of cutting forces. *Machine Science*, 2023, No1, pp. 55–60.
15. Юсубов Н.Д. Матричные модели точности обработки в одноинструментной токарной обработке. *Технология машиностроения*, №1, 2009, с. 41–45.
16. Юсубов Н.Д. Многоинструментная обработка на станках-автоматах токарной группы (Матричная теория точности...). Саарбрюккен: AV Akademikerverlag / LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 256 с.
17. Юсубов Н.Д. Основы матричной теории точности многоинструментной токарной обработки. Саарбрюккен: OmniScriptum / LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 216 с.
18. Юсубов Н.Д. Оптимизация многопереходной обработки по критерию производительности. Саарбрюккен: OmniScriptum / LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 264 с.
19. Yusubov N., Abbasova H. Models for Machining Accuracy in Multi-Tool Adjustment. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2020, 17(3), pp. 8067–8085. DOI: 10.15282/ijame.17.3.2020.01.0605.

20. Yusubov N., Abbasova H., Khankishiyev İ. Development of a planning theory for multi-tool machining with the possibilities of modern CNC machine tools. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2021, Vol. 85, pp. 661–678. DOI: 10.1007/s10010-021-00478-7
21. Yusubov N.D., Abbasova H.M. Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on multi-purpose CNC machines. *Metal Working and Material Science*, 2021, Vol. 23, No. 4, pp. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-6-20.
22. Abbasov İ.T., Simon S., Fritzsche P.D., Yusubov N.D. Study on reducing energy consumption in rough turning operations. *SOCAR Proceedings*, 2022, Special Issue 1, pp. 023–028.
23. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R., Salmanov İ. On the matrix generalization of the theory of machining accuracy. *Machine Science*, 2022, Vol. 11, No. 2, pp. 23–36.
24. Yusubov N.D., Abbasova H.M. Systematics of multi-tool setup on lathe group machines. *Metal Working and Material Science*, 2024, Vol. 26, No. 4, pp. 92–111. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-92-111.
25. Юсубов Н.Д. Матричные модели точности в многоинструментных двухсуппортных наладках. *Вестник машиностроения*, 2009, №3, pp. 52–54.
26. Yusubov N., Abbasova H. Full Factorial Models of Dimensional Accuracy of Multi-Tool Machining on Automatic Turning Machines. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*, 2019, Vol. 19, Issue 1, pp. 56–67.
27. Yusubov N., Movlazade V., Abbasova H. Accuracy models of machining in multi-tool adjustments. *Proceedings of the 8th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications (COIA 2022)*, Vol. 2, pp. 477–479.
28. Yusubov N. Matrix Models of Processing Accuracy in Multitool Turning. *Mechanical Engineering Technology*, 2013, Issue 1, pp. 57–63.
29. Yusubov N. Algorithmization of analytical model of dimensions stray field, executed in multi-tool multi-carriage adjustments. *Vestnik Mashinostroeniya*, 2008, Vol. 2, pp. 54–56.
30. Yusubov N., Khankishiyev İ., Abbasova H., Mammadov E., Huseynov R. Matrix models of machining errors in multi-tool multi-carriage adjustments. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 2023, Vol. 15, Issue 56, pp. 309–315.
31. Юсубов Н.Д. Повышение эффективности многоинструментной обработки на станках автоматах токарной группы: автореферат диссертации доктора технических наук. Баку, 2009, 41 с.
32. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Guzeev V.I., Yusubov N.D., Abbasova G.M. Increasing the productivity of multitool machining on automated lathes by optimizing the tool positions. *Russian Engineering Research*, 2021, Vol. 41, Issue 11, pp. 1075–1079.
33. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Yusubov N.D., Mammadov P.V., Bazhenov R.I. Increasing the Productivity of Multitool Machining on Automated Lathes by Optimizing the Machining Plan. *Russian Engineering Research*, 2021, Vol. 41, pp. 1071–1074.
34. Bogatenkov S.A., Sazonova N.S., Yusubov N.D., Abbasova H.M., Badalova B.B., Bazhenov R.I. Decision-making in the conditions of introduction of automated design systems of technological processes. *SOCAR Proceedings*, 2022, Special Issue 1, pp. 006–010.

RPİ DƏZGAHLARINDA KONİK SƏTHLƏRİN EMAL DƏQİQLİYİNİN MODELƏŞDİRİLMƏSİ

N.D.Yusubov, H.M.Abbasova, R.Y.Dadaşov

Xülasə. Məqalədə RPİ (rəqəmli proqramla idarə olunan) dəzgahlarda konik səthlərin emalının dəqiqlik modelləri tədqiq edilmişdir. Konik səthlərin doğuran boyunca forma və ölçü sapmalarına təsir edən əsas faktorlar – interpolasiya xətaləri, alət həndəsəsi və yeyilməsi, termiki deformasiyalar və elastik sapmalar – müəyyən edilərək riyazi model qurulmuşdur. Aparılan eksperimental tədqiqatlar göstərmişdir ki, sərt karbidli alətlərin tətbiqi, düzgün təmiz emal keçidi və RPİ sistemində kompensasiya mexanizmlərinin istifadəsi səth keyfiyyətini və konus bucağı dəqiqliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Hazırlanan model RPİ dəzgahlarda konik səthlərin optimallaşdırılmış emalı üçün effektiv vasitə kimi istifadə oluna bilər. Eyni zamanda, bu model emal prosesində məhsuldarlığın yüksəldilməsinə və nəticələrin sabitliyinin təmin edilməsinə də imkan verir. Təklif olunan yanaşma RPİ texnologiyalarında konik səthlərin istehsalında həm yüksək dəqiqlik, həm də səmərəlilik əldə etmək məqsədilə mühüm əhəmiyyət daşıyır. Nəticədə, model istehsal proseslərinin planlaşdırılmasını və idarə edilməsini optimallaşdırmağa kömək edir.

Açar sözlər: RPİ dəzgahı, konik səth, dəqiqlik modelləri, təmiz emal, karbid alət.

Accepted: 05.12.2025

KORROZİYADAN MÜHAFİZƏDƏ İNNOVATİV TEXNOLOGİYALARIN TƏTBİQİNİN TƏHLİLİ

Ürfan Rəhman oğlu Mirzəyev, Elşən Feyruz oğlu Sultanov
Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye universiteti, Bakı, Azərbaycan

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN CORROSION PROTECTION

Urfan Rahman Mirzayev, Elshan Feyruz Sultanov

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

urfanmirzeyev554@gmail.com, elshensultanov1982@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-9743-4473>, <https://orcid.org/0009-0007-9836-2091>

Abstract. The corrosion process is an important problem that reduces the service life of metallic structures, pipelines, and industrial equipment, causing economic losses and environmental risks. In the modern era, the application of innovative technologies plays a crucial role in combating this process. In recent years, nanomaterial-based coatings, smart inhibitor systems, and automated versions of electrochemical and cathodic protection methods have been widely used in corrosion protection. These technologies create more durable and self-healing protective layers on metal surfaces, ensuring long-term stability under operating conditions. At the same time, digital monitoring and sensor-based tracking systems enable real-time control of corrosion processes. The conducted analyses show that the application of innovative protection methods increases the operational reliability of equipment, reduces maintenance costs, and significantly enhances the safety of industrial facilities.

Keywords: corrosion protection, innovative technologies, nanomaterial-based coatings, cathodic protection systems, smart inhibitors, sensor monitoring.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Giriş

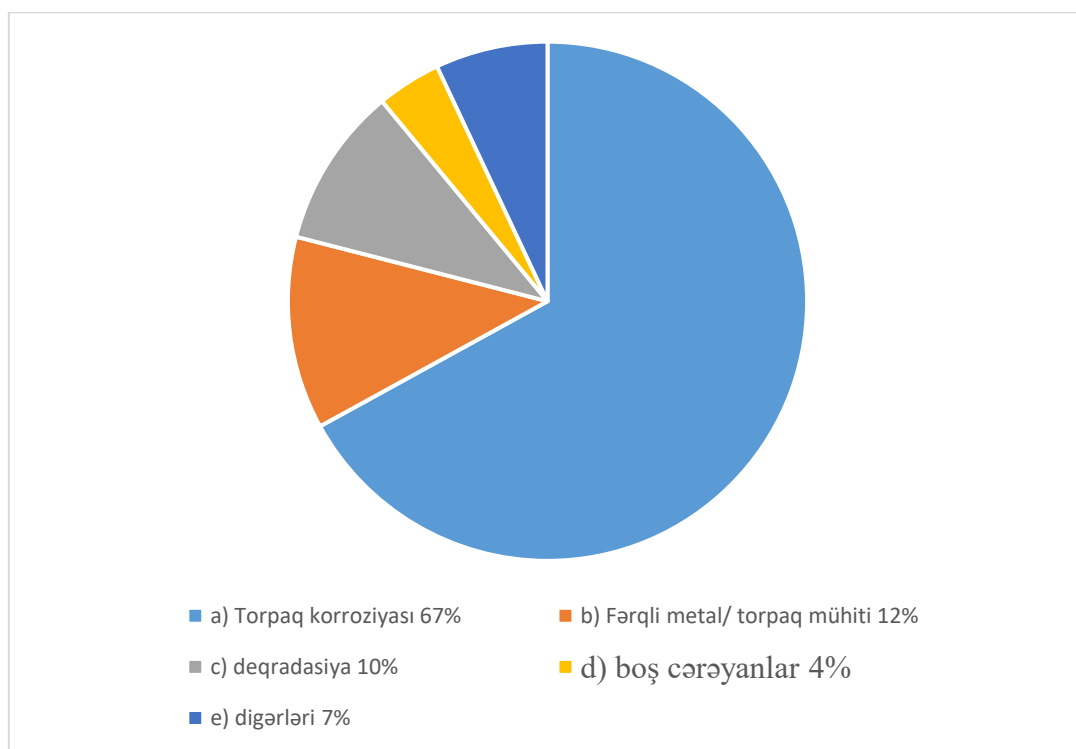
Korroziya sənaye avadanlıqları, nəqliyyat vasitələri və mühəndis infrastrukturunda materialların istismar müddətini məhdudlaşdıran əsas fiziki-kimyəvi proseslərdən biridir. Metal və ərintilərin mühitlə qarşılıqlı təsiri nəticəsində baş verən kimyəvi və elektrokimyəvi parçalanma onların mexaniki möhkəmliyini zəiflədir, qəza və sızma risklərini artırır və texniki xidmət xərclərini yüksəldir. Qlobal qiymətləndirmələrə görə, korroziya səbəbindən yaranan iqtisadi itkilər ÜDM-in 3–4%-i həcmindədir ki, bu da enerji və neft-qaz sənayesi üçün ciddi maliyyə yükü yaradır. Azərbaycanda boru kəmərləri, təzyiqli qurğular və digər metal konstruksiyalar mühitin aqressivliyinə görə korroziya təhlükəsinə xüsusi həssaslıq göstərir. Ənənəvi mühafizə üsulları (örtüklər, mexaniki təmizləmə, klassik inhibitorlar) dəyişkən temperatur, təzyiq və kimyəvi tərkib şəraitində məhdud effektivlik nümayiş etdirir. Bu səbəbdən müasir sənaye daha davamlı və funksional sistemlərə ehtiyac duyur. Son illərdə nanomaterial əsaslı örtüklər, ağıllı inhibitor sistemləri və avtomatlaşdırılmış katodik mühafizə modelləri korroziya nəzarətində yeni yanaşma formalaşdırmışdır. Bu texnologiyalar səthdə yüksək stabilliyə malik baryer yaradaraq ənənəvi üsullara nisbətən daha uzunmüddətli qoruma təmin edir.

Nanostruktur örtüklər səth enerjisinin azaldılması və ion diffuziyasının məhdudlaşdırılması hesabına oksidləşmə prosesini ləngidir. Onların yüksək adeziya və aşağı keçiricilik xüsusiyyətləri sərt sənaye şəraitində davamlılığını artırır. Ağıllı inhibitorlar mühitin kimyəvi aktivliyinə adaptiv reaksiya verərək yalnız korroziya təhlükəsi yaranıqda aktivləşir və reagent sərfini optimallaşdırır. Rəqəmsal monitoring və sensor şəbəkələri isə korroziya sürəti, potensial fərqi və mühit parametrlərini real vaxt rejimində ölçərək qəza hallarının proqnozlaşdırılmasını və texniki xidmətin optimallaşdırılmasını mümkün edir. Aparıcı sənaye qurumları hazırda korroziyadan mühafizənin material elmləri, elektronika və süni intellektin integrasiyasına əsaslanan “ağıllı sistem modeli”nə keçidini sürətləndirir. Belə yanaşma yalnız konstruksiyaların uzunömürlülüynü artırmır, həm də təhlükəsizlik, iqtisadi səmərəlilik və ekoloji dayanıqlılıq göstəricilərini yaxşılaşdırır. Bu tədqiqatın əsas sualı belə formalaşdırılır: “Neft-qaz avadanlıqlarında korroziyadan mühafizə üçün tətbiq olunan innovativ texnologiyaların effektivliyi necə qiymətləndirilə bilər?”

Tədqiqatın məqsədi, məsələnin qoyuluşu

Bu tədqiqatın məqsədi sənaye sahələrində korroziyadan mühafizənin effektivliyini artırmaq üçün tətbiq olunan innovativ texnologiyaların elmi və texniki baxımdan təhlil edilməsidir. İş çərçivəsində müxtəlif mühafizə üsullarının müqayisəli araşdırılması, onların iş prinsiplərinin və performans göstəricilərinin müəyyənəşdirilməsi əsas istiqamətlər kimi müəyyən olunmuşdur. Korroziya neft-qaz, kimya, energetika və metallurgiya kimi sahələrdə ciddi iqtisadi və texnoloji itkilərə səbəb olduğu üçün tədqiqatın mühüm vəzifəsi mövcud mühafizə metodlarının məhdudiyyətlərini müəyyənəşdirmək və yeni nəsil texnologiyaların tətbiq potensialını qiymətləndirməkdir. Bu məqsədlə nano-material əsaslı qoruyucu örtüklərin, elektrokimyəvi mühafizə sistemlərinin və ağıllı inhibitorların müxtəlif sənaye şəraitlərində səmərəliliyi araşdırılır və optimal texnoloji kombinasiyanın müəyyənəşdirilməsi hədəflənir.

Tədqiqatın digər məqsədlərindən biri mühafizə texnologiyalarının enerji və resurs səmərəliliyini artırmaqdır. Müasir sənayedə yalnız materialların qorunması deyil, həm də iqtisadi və ekoloji dayanıqlılığın təmin edilməsi prioritet hesab olunur. Bu kontekstdə korroziya proseslərinin rəqəmsal monitoring sistemləri vasitəsilə izlənilməsi və real vaxtda analizi xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Sensor və süni intellekt texnologiyalarının integrasiyası korroziya risklərinin proqnozu və idarəetmə qərarlarının avtomatlaşdırılması üçün imkan yaradır. Tədqiqat həmçinin tətbiq olunan mühafizə üsullarının ekoloji təsirinin qiymətləndirilməsini və "yaşıl texnologiyalar"a keçid imkanlarını araşdırır. Xüsusilə toksik inhibitorların alternativ ekoloji təhlükəsiz materiallarla əvəz edilməsi və nanokompozit örtüklərin tətbiqi ətraf mühitin qorunması baxımından prioritet istiqamət kimi nəzərdən keçirilir [1].



Torpağa basdırılmış boruların korroziyasının səbəbləri

Eyni zamanda, korroziyadan mühafizə sistemlərinin ağıllı idarəetmə modellərinin işlənməsi üçün elmi baza formalaşdırılır. Bu modellər proses parametrlərinə uyğun adaptiv tənzimləmə mexanizmlərini təmin edə bilər. Tədqiqatın məqsədlərindən biri də sənaye obyektlərində tətbiq edilən innovativ mühafizə texnologiyalarının praktik nümunələrinin təhlil edilməsi və laboratoriya ilə real istehsalat şəraiti arasındakı fərqlərin müəyyənəşdirilməsidir. Şəkildə torpağa basdırılmış borularda korroziya səbəbləri göstərilmişdir. Tədqiqatın nəticəsi olaraq korroziyadan mühafizənin kompleks yanaşma modeli – kimyəvi, elektrokimyəvi və mexaniki üsulların integrasiyasına əsaslanan sistem

konsepsiyası hazırlanacaq. Bu model sənaye müəssisələri üçün uzunmüddətli və iqtisadi cəhətdən səmərəli həll variantı kimi çıxış edə bilər.

Korroziya, sənaye materiallarının kimyəvi və elektrokimyəvi degradasiyası nəticəsində yaranan, avadanlıqların istismar müddətini azaldan və qəza risklərini artıran global problemdir. Xüsusilə neft-qaz, kimya, energetika və metallurgiya sahələrində istifadə olunan metal konstruksiyalar daimi olaraq aqressiv mühitlə təmasda olur. Bu şəraitdə ənənəvi mühafizə üsullarının effektivliyi zaman keçdikcə azalır və nəticədə texniki, iqtisadi və ekoloji problemlər yaranır. Hazırkı dövrdə korroziyadan mühafizənin klassik üsulları-boya örtükləri, passiv inhibitorlar və katodik mühafizə sistemləri-yüksək temperatur, təzyiq və rütubət dəyişkənliyi olan mühitlərdə istənilən səviyyədə nəticə vermir. Bu isə sənaye obyektlərində qəfil nasazlıqların, boru sızmalarının və avadanlıq sıradan çıxmalarının artmasına səbəb olur [2].

Müasir sənaye istehsalında dayanıqlılıq, enerji səmərəliliyi və ekoloji təhlükəsizlik əsas prioritetlərə çevrilmişdir. Bu kontekstdə ənənəvi mühafizə üsullarının yerini tədricən innovativ texnologiyalar tutur. Lakin bu texnologiyaların tətbiqi və səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi hələ də tam sistemləşdirilməmiş sahədir. Burada əsas məsələ-texnoloji yeniliklərin praktiki tətbiqə uyğunlaşdırılması və onların fərqli sənaye şəraitində davranışının öyrənilməsidir.

Korroziya prosesi çoxfaktorlu və kompleks xarakter daşıyır: mühitin kimyəvi tərkibi, temperatur, materialın strukturu, axın sürəti və elektrokimyəvi potensial kimi parametrlər bir-birinə təsir edir. Buna görə də bu prosesin qarşısını almaq üçün vahid və universallığı təmin edən texnologiya yoxdur. Məsələ ondan ibarətdir ki, hər bir şərait üçün optimal mühafizə sistemi seçilməli və onun uzunmüddətli təsiri elmi cəhətdən əsaslandırılmalıdır. Digər tərəfdən, korroziyadan mühafizə sahəsində aparılan bir çox tədqiqatlar laboratoriya şəraitində əldə edilən nəticələrlə məhdudlaşır. Reallıqda isə sənaye mühitinin mürəkkəbliyi və çoxkomponentli təsirləri nəzərə alınmır. Buna görə tədqiqatın qarşısında duran əsas məsələ bu texnologiyaların real istismar şəraitində səmərəliliyini qiymətləndirmək və təkmilləşdirilmiş model təqdim etməkdir.

Müasir dövrdə “ağıllı” (smart) materiallar, nanokompozit örtüklər və rəqəmsal monitoring sistemləri korroziyadan mühafizədə yeni imkanlar açır. Lakin bu texnologiyaların sənaye müəssisələrində tətbiqi, idarəedilməsi və iqtisadi cəhətdən əsaslandırılması hələ də tam öyrənilməmişdir. Bu isə tədqiqatın aktuallığını daha da artırır. Beləliklə, tədqiqatın qarşısında duran məsələ - korroziyadan mühafizə prosesinin innovativ texnologiyalar vasitəsilə optimallaşdırılması, tətbiq edilən üsulların elmi əsaslandırılması və onların texnoloji, iqtisadi və ekoloji baxımdan üstünlüklərinin təhlil edilməsidir. Bu məqsədlə mühafizə sistemlərinin iş prinsipləri, tətbiq sahələri və səmərəlilik göstəriciləri geniş şəkildə araşdırılmalıdır.

Məsələnin həlli üsulları və aprobeasiyası

Korroziyadan mühafizə məsələsinin həlli kompleks yanaşma tələb edir, çünki prosesin səbəbləri çoxşaxəlidir və həm fiziki, həm kimyəvi, həm də elektrokimyəvi amillərin qarşılıqlı təsiri ilə formalaşır. Buna görə də tədqiqatda bir neçə istiqamət üzrə həll üsullarının birgə tətbiqi nəzərdə tutulur: material elmləri, elektrokimya, nanotexnologiya və rəqəmsal nəzarət sistemləri.

Əvvəlcə problemin nəzəri əsasları metal səthində gedən oksidləşmə və reduksiya reaksiyalarının mexanizmi təhlil edilir. Bunun üçün korroziya kinetikasını təsvir edən əsas tənliklər, elektrod potensialı fərqləri və mühitin pH dəyərlərinin təsiri öyrənilir. Bu mərhələdə məqsəd korroziya prosesinə təsir edən dominant amilləri müəyyən etməkdir.

Növbəti mərhələdə nanomaterial əsaslı qoruyucu örtüklərin tətbiqi üsulları araşdırılır. Xüsusilə TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 və SiO_2 kimi oksid nanohissəcikləri ilə zənginləşdirilmiş kompozit örtüklər korroziya müqavimətini artırmaq üçün sınaqdan keçirilir. Bu materiallar yüksək adeziya qabiliyyəti və kimyəvi dayanıqlılığı ilə fərqlənir, həmçinin mikroçatların yaranmasının qarşısını alır.

Tədqiqatın bir hissəsi ağıllı inhibitor sistemlərinin tətbiqinə yönəldilmişdir. Bu sistemlərdə inhibitor molekulları yalnız korroziya prosesi aktivləşdiyi zaman səthlə reaksiyaya girir. Beləliklə, həm kimyəvi maddələrin sərfiyyatı azalır, həm də mühitin ekoloji balansı qorunur. Bu üsul

“stimullaşdırılmış reaksiya mexanizmi” prinsipi ilə işləyir. Əlavə olaraq, elektrokimyəvi və katodik mühafizə sistemlərinin avtomatlaşdırılması tədqiq olunur. Bu üsullarda qoruma potensialı sensorlar vasitəsilə real vaxtda ölçülür və sistem avtomatik şəkildə cərəyanı tənzimləyir. Bu, həm enerji sərfini azaldır, həm də metal səthinin optimal qoruma səviyyəsini təmin edir [3].

Rəqəmsal texnologiyalar da məsələnin həllində mühüm yer tutur. Sensor əsaslı korroziya monitoring sistemləri vasitəsilə mühit parametrləri (rütubət, temperatur, pH, ion aktivliyi) real vaxtda qeydə alınır. Toplanan məlumatlar süni intellekt alqoritmləri ilə təhlil edilərək, korroziya riskləri öncədən proqnozlaşdırılır. Bu yanaşma texniki xidmət planlarının optimallaşdırılmasına və qəza hallarının qarşısının alınmasına şərait yaradır. Tədqiqatın nəticələri həm laboratoriya sınaqları, həm də sənaye şəraitində aparılan aprobeşiyalar vasitəsilə yoxlanılır. Laborator sınaqlar zamanı müxtəlif örtüklərin və inhibitorların duzlu, turşulu və yüksək temperatur mühitlərdə davranışı öyrənilir. Eyni zamanda, metal nümunələrinin kütlə itkisi, səth morfologiyası və elektrokimyəvi müqavimət parametrləri ölçülür. Müxtəlif innovativ korroziya inhibitorlarının təsir effektivliyi cədvəldə göstərilmişdir [4].

Cədvəldə müxtəlif elmi mənbələrdə təqdim olunan innovativ korroziya mühafizə texnologiyalarının laboratoriya aprobeşiyası nəticələri sistemləşdirilmişdir. Təhlil göstərir ki, fərqli inhibitor və örtük texnologiyaları müxtəlif mühitlərdə metal səthinin korroziya sürətini əhəmiyyətli dərəcədə azalda bilər. Ağıllı inhibitorların kapsullaşdırılmış strukturu onların korroziya aktivləşən kimi səthə yönəlmiş şəkildə sərbəst buraxılmasına səbəb olur və bu texnologiya karbon poladda 78%-ə qədər qoruma təmin edir. Nano-hissəcik tərkibli TiO_2 inhibitorları səthin aktivləşmə enerjisini azaldaraq turş mühiddə belə yüksək effektivlik (85%) nümayiş etdirir.

Müxtəlif innovativ korroziya inhibitorlarının təsir effektivliyi

No	İnnovativ texnologiya / inhibitor tipi	Metal növü	Sınaq mühiti	Konsentrasiya (ppm)	Kütlə itkisi ($\text{mq/sm}^2 \cdot \text{gün}$)	Korroziya sürəti azalması (%)
1	Ağıllı inhibitor – kapsullaşdırılmış signalverici inhibitor	Karbon polad	NaCl 3,5%	250	0.42	78%
2	Nano-hissəcik tərkibli inhibitor (TiO_2 -nano)	Karbon polad	Suda HCl 1M	150	0.35	85%
3	İon mayesi əsaslı inhibitor	Paslanmaz polad	NaCl 5%	300	0.18	92%
4	Grafen oksid əsaslı qoruyucu kompozit örtük	Karbon polad	Dəniz suyu	–	0.12	95%
5	Polimer-kompozit örtük	Alaşımli polad	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ mühiti	–	0.09	96%

İon mayesi əsaslı inhibitorlar daha yüksək elektrokimyəvi sabitlik göstərərək 92%-ə qədər qoruma təmin etmişdir. Grafen oksid kompozit örtüyü və “self-healing” polimer sistemləri ən yüksək nəticələr göstərən texnologiyalar olmuş, müvafiq olaraq 95% və 96% korroziya sürəti azalması təmin etmişdir. Bu, onların səthdə davamlı diffuziya baryeri yaratması və zədələnmə zamanı özünü bərpa etmə qabiliyyəti ilə izah olunur. Beləliklə, müxtəlif tədqiqatların laboratoriya nəticələrinin müqayisəsi göstərir ki, innovativ inhibitor və örtük texnologiyalarının tətbiqi metal konstruksiyaaların istismar müddətinin artırılmasında mühüm imkanlar yaradır.

Aprobeşiyanın ikinci mərhələsi real sənaye obyektlərində həyata keçirilir. Burada təcrübə nümunələri (metal boru seqmentləri və reaktor divarları) müxtəlif mühafizə üsulları ilə işlənir və müəyyən müddət ərzində istismara buraxılır. Toplanan nəticələr göstərir ki, innovativ qoruyucu sistemlərin tətbiqi ilə korroziya dərinliyi 30–50% azalmış, texniki xidmət intervalları isə 1,5–2 dəfə uzanmışdır. Tətbiq olunan sistemlərin effektivliyi səth analizləri (SEM, EDS və XRD üsulları) vasitəsilə qiymətləndirilir. Bu analizlər metal səthindəki qoruyucu təbəqənin qalınlığını, tərkibini və

mikrostrukturunu müəyyən etməyə imkan verir. Nəticələr göstərir ki, nanokompozit örtüklər daha homogen və məsəməsiz struktur yaradır ki, bu da onların yüksək davamlılığını izah edir [5].

Ümumilikdə, aparılmış aprobeziyalar göstərir ki, korroziyadan mühafizədə innovativ texnologiyaların tətbiqi yalnız material səthinin dayanıqlığını artırmır, həm də iqtisadi və ekoloji üstünlüklər yaradır. Beləliklə, bu tədqiqat praktiki baxımdan tətbiq edilə bilən, etibarlı və davamlı həll modelini təklif edir.

Nəticə

Müasir sənaye sahələrində korroziya prosesləri avadanlıqların dayanıqlığına və istismar müddətinə birbaşa təsir göstərir. İnnovativ texnologiyaların tətbiqi korroziyanın qarşısını almaqda ənənəvi üsullardan daha effektiv və uzunömürlü nəticələr verir. Nanomaterial əsaslı qoruyucu örtüklər səthlə daha güclü bağ quraraq materialın mexaniki və kimyəvi davamlılığını artırır. Katodik və anod mühafizə sistemlərinin avtomatlaşdırılması enerji səmərəliliyini və nəzarət dəqiqliyini artırır. Sensor və IoT texnologiyalarının tətbiqi real vaxtda korroziya dərəcəsinin monitorinqini təmin edir. Bu yanaşmalar istismar xərclərinin azalmasına və qəza risklərinin minimuma endirilməsinə şərait yaradır. İnnovativ metodlar həm ekoloji, həm də iqtisadi baxımdan davamlı inkişaf prinsiplərinə uyğundur. Sənaye müəssisələrində bu texnologiyaların tətbiqi məhsuldarlığın və təhlükəsizliyin yüksəlməsinə səbəb olur. Ümumilikdə, korroziyadan mühafizədə innovativ texnologiyalar gələcəkdə material mühəndisliyinin əsas istiqamətlərindən biri olacaqdır.

ƏDƏBİYYAT

1. Abbasov V.M., Hüseynova S.Ə. Korroziyaya qarşı yeni nəsil nanokompozit örtüklərin tədqiqi və effektivliyi. Azərbaycan Kimya Jurnalı, 2022, №4, s. 75–84.
2. Quliyev E.M. Sənaye avadanlıqlarında korroziya və onun qarşısının alınması texnologiyaları. AzTU-nun elmi əsərləri, 2021, №3, s. 120–130.
3. Əliyev R.Q., Məmmədova, T.N. Neft-qaz sənayesində korroziyanın idarə edilməsində süni intellekt və digital texnologiyaların tətbiqi imkanları. Neft və Qaz Problemləri Jurnalı, 2023, №1, s. 45–55.
4. Tağıyev D.B., Sultanov K.İ. Ağır şəraitdə işləyən metal konstruksiya korroziyadan mühafizəsində plazma elektrolitik oksidləşmə texnologiyası. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, 2021, №2, s. 112–120.
5. Hacıyeva L.Ə., Qurbanov F.Ş. Biokorroziyanın qarşısının alınmasında istifadə olunan innovativ inhibitorların ekotoksikoloji aspektləri. Ekologiya və Sənaye Jurnalı, 2024, №1, s. 33–41.
6. Quliyev E.M., Rzayev S.K. Dənizdə quraşdırılmış neft-qaz qurğularının korroziyadan mühafizəsi üçün hibrid örtük sistemləri. Xəzər Dənizi Problemləri və İnnovasiyalar, 2020, №3, s. 98–107.

KORROZİYADAN MÜHAFİZƏDƏ İNNOVATİV TEXNOLOGİYALARIN TƏTBİQİNİN TƏHLİLİ

Ü.R.Mirzəyev, E.F.Sultanov

Xülasə. Korroziya prosesi metallik konstruksiya, boru kəmərlərinin və sənaye avadanlıqlarının istismar müddətini azaldan, iqtisadi zərərlərə və ekoloji risklərə səbəb olan mühüm problemdir. Müasir dövrdə bu proseslə mübarizə aparmaq üçün innovativ texnologiyaların tətbiqi xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Son illərdə korroziyadan mühafizədə nanomaterial əsaslı örtüklər, ağıllı (smart) inhibitor sistemləri, elektrokimyəvi və katodik mühafizə üsullarının avtomatlaşdırılmış versiyaları geniş tətbiq olunur. Bu texnologiyalar metal səthində daha davamlı və özünü bərpa edən qoruyucu təbəqə formalaşdıraraq, istismar şəraitində uzunmüddətli sabitlik təmin edir. Eyni zamanda rəqəmsal monitorinq və sensor əsaslı izləmə sistemləri vasitəsilə korroziya proseslərinin real vaxtda nəzarəti mümkün olur. Aparılmış təhlillər göstərir ki, innovativ mühafizə üsullarının tətbiqi avadanlıqların istismar etibarlılığını artırır, texniki xidmət xərclərini azaldır və sənaye obyektlərinin təhlükəsizliyini əhəmiyyətli dərəcədə yüksəldir.

Açar sözlər: korroziyadan mühafizə, innovativ texnologiyalar, nanomaterial əsaslı örtüklər, katodik mühafizə sistemləri, ağıllı inhibitorlar və sensor nəzarəti.

Accepted: 08.12.2025

TURİZM LOGİSTİKASININ NƏQLİYYAT TƏMİNATINDAKI TƏSƏRRÜFATLARDAN KOMPLEKS İSTİFADƏ TƏDBİRLƏRİNİN GENİŞLƏNDİRİLMƏSİ

Heybətulla Mabud oğlu Əhmədov, Qəzənfər Nəsrulla oğlu Axundov

Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan

FROM FARMS IN THE TRANSPORT PROVISION OF TOURISM LOGISTICS EXPANSION OF COMPLEX USE MEASURES

Heybatulla Mabud Ahmadov, Gazanfar Nasrulla Akhundov

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan: heybetahmed@aztu.edu.az, qezenfer.axundov@aztu.edu.az

<https://orcid.org/0009-0001-2798-6477>

<https://orcid.org/0009-0004-1448-164X>

Abstract. In the article, it is stated that the evaluation of the activity of transport types from the transports carried out in the transport enterprises engaged in the transport provision of tourism is carried out according to the level of performance of the indicators characterizing the transport services, and it is shown that the interests of the development of tourism in the form of transport services appear in a contradictory form with a number of plan indicators. It is stated that it is also appropriate to take into account the indicator of "general economic efficiency in passenger transport", which is put forward as the final financial result of the work of all enterprises serving passenger transportation, in the planning process. The use of the general economic efficiency indicator in the mentioned economic practice leads to the requirement of organizational separation of the "passenger transport" sub-field in passenger transport types. In this regard, it is proposed to apply the "general economic efficiency" indicator to all types of transport used in the field of tourism logistics.

Keywords: *tourism logistics, transport provision of tourism, transport enterprises, transport logistics, "general economic efficiency" indicator.*

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Giriş. Məlumdur ki, nəqliyyatın turizmin inkişafındakı imkanları, turistlərə təkcə nəqliyyat xidmətlərinin təklif edilməsi ilə kifayətlənmir. Nəqliyyat logistikasında turizmin özü yerdəyişmə, qonaqpərvərlik, əyləncə, həmçinin qidalanma xidmətləri də daxil olmaqla, səyahət və istirahət edən insanlara kompleks xidmətlər təklif edir. Qeyd edilənlərdən başqa nəqliyyat logistikası səyahətçilər üçün bir sıra digər xidmətlər də təşkil etmək imkanına malikdir. Sırf logistik turizm mövqeyindən baxdıqda, sənişin nəqliyyatına ancaq hərəkət tərkibi kimi yanaşmaq olmaz. Əgər ümumilikdə nəqliyyatla sənişin daşımaları həyata keçirilməzsə, onda fəaliyyət göstərməsi lazım və mümkün olmayan bir sıra müəssisələrə də ehtiyac qalmaz.

Məsələnin qoyuluşu. Hazırda fəaliyyətdə olan təsərrüfat hesabı şəraitində hər bir mövcud müəssisənin təsərrüfat-iqtisadi göstəricilərinin nəticələrini dəqiq müəyyən etməyə cəhd göstərməyin qanunauyğunluğu, nəqliyyatın təşkilati strukturunun ortaya çıxmasının vacibliyi nəticəsində ümumilikdə bütün sənişindəşma kompleksinin səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi vacibliyinin nəzərə alınması tələbinin reallaşdırılmasına gətirib çıxartdı. Ona görə də öz mövcudluqlarına görə həqiqətən borclu olduqları sənişin axınından tamamilə asılı olan bir sıra müstəqil müəssisələr yaranmış oldu. Bu cür müəssisələrə aşağıdakıları aid etmək mümkündür:

- vağzallar, sənişin agentlikləri, aeroportlar, stansiyalar, pavilyonlar, sahil-liman körpüsünə aid təsərrüfatın tərkibindəki yerüstü stansiya tipli müəssisələr;
- turist-ekskursiya idarəsi, mehmanxana, istirahət otağı, baqajın saxlanma kamerası, öncədən biletlərin satış kassası;
- müxtəlif nəqliyyat növlərində təşkil olunan ticarət və ictimai işə müəssisələri və s.

Qeyd edilən bu müəssisələrin işinin nəticələri, hazırda turizmin nəqliyyat təminatı ilə məşğul olan müxtəlif nəqliyyat vasitələrinin fəaliyyətlərinin iqtisadi səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi zamanı nəzərə alınır [1, s. 76–88; 2, s. 111–118].

Məsələnin həlli. Turizmin nəqliyyat təminatı ilə məşğul olan nəqliyyat növlərinin fəaliyyətinin qiymətləndirilməsi, birinci növbədə bilavasitə nəqliyyat xidmətlərini xarakterizə edən göstəricilərin yerinə yetirilmə səviyyəsinə görə aparılır. Ancaq nəzərə almaq lazımdır ki, nəqliyyat xidmətləri

şəklində turizmin inkişaf etdirilmə maraqları, bir sıra plan göstəriciləri ilə ziddiyyətli formada çıxış edir. Məsələn, sənişin daşınmasında nəqliyyatın işinin sənişin-kilometrlərlə (səni·km) ifadə edilməsi, nəqliyyatın hərəkət sürətinin artırılması və nəqliyyat vasitələrinin dövriyyəsinin sürətləndirilməsindən aslıdır. Nəqliyyat logistikasında turistlərə yüksək xidmət göstərilməsi məqsədi ilə müəyyən məntəqələrdə dayanma-durmaların davamiyyət müddəti mühüm rol oynadığından, bu da nəqliyyatın işinin azalmasına və onun maya dəyərinin artmasına səbəb olur. Ona görə də, turistlərə xidmət göstərilən zaman nəqliyyat işinin qiymətləndirilməsi məqsədi ilə digər meyarlardan da istifadə etmək lazımdır. Məsələn, bu məqsədlə nəqliyyatın gördüyü işi “gətirilmiş səni·km” ölçü vahidi ilə qiymətləndirilməsi daha məqsədəuyğun sayılır. Yəni, turizm logistikasında istifadə olunan nəqliyyatın gördüyü işin hər səni·km-lə miqdarı, adi halda mövcud olan sənişin daşımalarına nisbətən daha yüksək olması anlamına gəlir. Bu da turizmin inkişafı ilə əlaqədar olaraq bu sahəyə xidmət edən nəqliyyat idarələrinin xalis nəqliyyat işinin miqdarında onların uduzmalarına gətirib çıxarır. Qeyd edilənləri nəzərə alaraq, nəqliyyat təsərrüfatlarının planlarında turist daşımaları ilə bağlı görülməş işin həcmi və gələcək logistik nəqliyyat turizminin inkişafını xarakterizə edən bəzi digər göstəricilərin də əlavə olunması vacib sayılır.

Qeyd edilənlərdən başqa, çay sənişin gəmilərinin fəaliyyətləri prosesində yaranan gəlirlər təkcə sənişinlərin daşınması ilə bağlı olmur. Yəni, bu halda gəlirlər yüklərin daşınmasından və “digər” yığımlardan da əldə edilir. Bu baxımdan da, ümumilikdə su nəqliyyatının və sənişin donanmasının işinin qiymətləndirilməsi məqsədi ilə ümumi bir kompleks göstəricinin tətbiq edilmə vacibliyi ortaya çıxır. Hazırda, sənişin donanmasında yüklərin və baqajın daşınmasından və “digər” yığımlardan əldə edilən gəlirlər nəzərə alınmır. “Digər” yığımlar dedikdə, buraya vanna otağından və ya duşdan sənişinlərin istifadə etmələrinə görə ödənişlərin həyata keçirilməsi aid edilir. Məlumdur ki, tranzit daşımaları ilə məşğul olan gəmilərdə duş kabinələrinin mövcudluğu, istirahət və rahatlıq üçün salonun olması səviyyəsi qədər vacibdir. Qeyd edilən hər iki hal üçün belə otaqların saxlanması xərcləri, sənişinlərin daşınmasına çəkilən xərclərə aid edilir. Bunların arasında yaranan fərq, yalnız bu xərclərin əvəzinin qaytarılması üsulu ilə əlaqədardır. Yəni, sənişindən duşdan istifadəyə görə əlavə ödəniş tələb olunsay da, gəmidə salondan istirahət üçün istifadə xərci biletin dəyərinə daxil edilir. Su nəqliyyatı ilə sənişin daşımalarından əldə olunan gəlirdən qeyd edilən xidmətlərə görə alınan məbləğin ixtisara salmasına isə heç bir əsas yoxdur.

Yuxarıda qeyd olunanlardan belə nəticə çıxarmaq olar ki, ümumilikdə və ya əksər hallarda sənişin daşımalarına xidmət edən bütün müəssisələrin işinin yekun maliyyə nəticəsi kimi irəli sürülən “sənişin nəqliyyatında ümumi iqtisadi səmərə” göstəricisinin planlaşdırılma prosesində nəzərə alınması məqsədəuyğun sayılmalıdır. Ona görə də, gəlirlər baxımından bu göstəriciyə edilən yönləşmələrə, sənişin nəqliyyatına aid olan kassalarda satılmış biletlərə uyğun olaraq əhalidən və məcburi sığorta yığımlarının məbləğindən gələn bütün ümumi gəlir daxil olunmalıdır. Hazırda bu cür yığımlar sənişin daşımalarından əldə olunan gəlirdən çıxarılaraq, sığorta şirkətlərinin hesabına köçürülür. Sığorta şirkətlərinin hesabına isə nəqliyyat müəssisələrində həyata keçirilən daşımalarından öz mədaxil mənbəsi olan müəyyən məbləğin də ayrılması nəzərdə tutulur. Sənişin bilet alarkən, onun müvafiq qiymətini təsdiq etməklə, ona göstəriləcək xidmətin istehlak dəyərinin sığorta qiymətinin bir hissəsini də təsdiq etmiş olur və bununlada o, eyni zamanda sığortalanma hüququ da əldə edə bilər.

Beləliklə də, dövlət büdcəsinə sığorta yığımının məbləği, sənişin nəqliyyatının xidmət dəyərinin həyata keçirilməsinin nəticəsi kimi daxil olduğundan, onun rentabelliyyənin müəyyən edilməsində bu məsələ mütləq nəzərə alınmalıdır. Əlbəttə ki, ümumi iqtisadi səmərəlilik göstəricisinin təbliğatının aparılması, sənişinlərə xidmət göstərmə prosesində iştirak edən bütün təsərrüfat bölmələrinin işinin ayrıca planlaşdırılması və qiymətləndirilməsi tələbini istisna etmir. Qeyd edilən təsərrüfat təcrübəsində ümumi iqtisadi səmərəlilik göstəricisinin istifadə olunması, sənişin nəqliyyat növlərində “sənişin nəqliyyatı” altsahəsinin təşkilati cəhətdən ayrılması anlamına gətirib çıxarır. Ona görə də, “ümumi iqtisadi səmərəlilik” göstəricisinin turizm logistikası sahəsində də istifadə edilən bütün nəqliyyat növlərində tətbiq olunması məqsədəuyğun sayılmalıdır.

Ölkəmizdə turizm logistikasının gələcək inkişafına təsir edəcək əsas amillərdən biri də, səyahət yerlərində turistlərin yerləşdirilməsi məqsədilə lazım gələn maddi-texniki bazanın təkmilləşdirilməsidir. Belə maddi-texniki bazanın təşkil edilməsi yüksək xərclərlə başa gəldiyindən, turistlərin səyahət məkanlarında rahat yerləşdirilməsi üçün əlavə yaşayış yerlərinin təşkil edilməsi və onlardan ilboyunca, xüsusən də mövsümlər arasındakı dövrlərdə məqsədyönlü istifadə olunma tələbi yaranır. Hazırda bu məsələnin müsbət həll edilməsinə nail olmaq məqsədiylə turizm sahəsində istifadə edilən mövcud nəqliyyat vasitələrindən turizmin mövsümlərarası tənəzzülü dövrlərində turistlərin yerləşdirilməsi üçün istifadə etməklə nail olmaq mümkündür [3, s. 211–222; 4, c. 332–333].

Məlumdur ki, turist daşımaları zamanı qatarların reyslərinin davamətmə müddətlərində qeyri-müntəzəmliyin yaranmasına baxmayaraq, “məkik” reyslərin təşkil edilməsi ilə, əksər hallarda hərəkət tərkiblərinin məhsuldarlığının 2-3 dəfə yüksəldilməsinə imkan yaratmaq mümkündür. Yəni, “məkik” üsulla qatar ilk reysini başa çatdırdıqdan sonra, turistləri istirahət düşərgəsinə gətirdikdən sonra, son məntəqədən ekskursiya müddəti başa çatmış turist qrupunu əks reyslə başlanğıc məntəqəyə geri qaytarır və yenə orada boş dayanmadan başlanğıc məntəqədən növbəti turist qrupunu istirahət düşərgəsinə gətirir. Bu üsulu dəmiryol nəqliyyatında istifadə etməklə, turizmin inkişaf etdirilmə imkanlarını daha da artırmaq mümkündür. Dəmiryol nəqliyyatında olduğu kimi, dəniz nəqliyyatında da payız-qış dövründə (aprel-iyun və sentyabr-oktyabr ayları) təşkil olunmuş turizm mövsümü inkişaf etməkdədir. Belə reyslər isti (Aralıq və Qara dənizlərdə, Afrika sahillərində və s.) zonalara da təşkil olunur. Dəniz gəmilərində təşkil olunan turist reysləri - adi və dəniz kruizinin təşkilinin ən mütərəqqi formalarından biri sayılan xətti reysləridir.

Turizm səyahətləri zamanı əvvəlcədən nəzərdə tutulan hər hansı yaşayış məntəqəsində turistlərin marağına səbəb olan və qonaqpərvərliyin səviyyəsi ilə səciyyələnən bir neçə saatdan bir neçə günə qədər uzun müddətli dayanmalar mövcud ola bilər. Turizm səyahətlərində uzun müddətli dayanmaların digər bir səbəb isə dayanma zamanı gəzintinin uzun müddət davam etməsi ilə əlaqədar olaraq səyahət müddətində turistlərə təbiətin qoynunda rahat istirahət etmək imkanının verilməsi ilə bağlıdır. Çay nəqliyyatı ilə gəzintilərdə bu cür dayanmalar “yaşıl duracaqlar” adlanır. “Yaşıl duracaqlar” anlayışı belə məqsəd daşıyan dayanacaqlar üçün başqa turizm nəqliyyatı növlərində də geniş istifadə edilir [5, c. 281–286].

Su turizmi inkişaf etdikcə “yaşıl duracaqlar”ın avadanlıqlaşdırılması məsələləri kəskin şəkildə özünü büruzə verir. Su turizmi sahəsində bəzi sahələrdə sahilə yanılma körpülərinin, həmçinin bir sıra ərazilərdə xüsusi sahil təsərrüfatlarının olmaması və bu məsələ ilə bağlı turistlərin istirahətinin lazımı səviyyədə təşkil edilmə imkanlarının tam ödənilməməsi, turizm logistikasında haqlı narazılıqlara səbəb olur. Bu məsələnin həlli yollarından biri kimi, artıq daimi istismardan çıxarılmış sərnişin gəmilərinin belə istirahət yerlərində istifadəsinin məqsədəuyğun olmasını qeyd etmək lazımdır. Bunun üçün belə gəmilərdə restoranların təchizat bazası yaradılmaqla, əlavə olaraq paltarların və ayaqqabıların təcili təmir işləri, mədəni məişət əşyalarının və suvenirlərin satışı, həmçinin turistlərin istifadə etmələri üçün idman ləvazimatlarının verilməsi və s. kimi tam xidmət kompleksi təşkil edilə bilər. Gəmidəki otaqların müəyyən hissəsindən turist bazası və pansiyat kimi də istifadə etmək mümkündür.

Yerləşdirmə vasitəsi kimi, istismardan kənarlaşdırılmış sərnişin gəmilərindən daha çox istifadə edilir. Onu da nəzərə almaq lazımdır ki, su nəqliyyat donanmasının yeniləşdirilməsilə bağlı sərnişindəşım xətlərində istismarını başa vurmuş çoxlu sayda gəmilər istismardan çıxarılır. Məlumdur ki, köhnəlmiş gəmilərin tam əsaslı təmiri yüksək əmək tutumuna malik olan bir prosesdir. O da məlumdur ki, bu iş sərf olunan məsrəflər, gəminin ləğv edilmə dəyərindən yüksək alınır. Bu səbəbdən də, gəmi donanması belə gəmiləri su nəqliyyatında mövcud olan digər müəssisələrin balansına verməyə çalışır. Belə müəssisələr isə bu gəmilərdən istirahət evi, turist bazası, profilaktoriya və s. məqsədlər üçün istifadə edirlər. Beləliklə də, su nəqliyyatının sərnişin donanma gəmilərinin qeyri-nəqliyyat vasitəsi kimi istifadə olunması, ictimaiyyət tərəfindən müsbət qarşılanmış olur [6, s. 396–400].

Gəmi-mehmanxananın ümumi maliyyə nəticələri, yaşamaq üçün kayutlarda yerlərin verilməsindən və “digər” əməliyyatlardan əldə olunan gəlirlə, gəminin saxlanmasına çəkilən xərclərin fərqi kimi təyin olunur. Belə gəmilərdə turistlərin yaşamasından əldə olunan gəlirin məbləği, təklif edilən yerin qiymətindən və bunlardan sənişinlərin istifadə səviyyəsindən asılı olur. Əslində belə xidmətlər üçün müəyyən edilən qiymətlərdə pərakəndəliyin aradan qaldırılması məqsədi ilə kommunal mehmanxanalarda nəzərdə tutulan ödəniş normalarına uyğun olaraq bu cür gəmi-mehmanxanalardakı yerlər üçün də ödəniş haqqı müəyyən edilməlidir. Həm də belə mehmanxanada yerə görə nəzərdə tutulan ödəniş, nömrənin dərəcəsi və rahatlıq səviyyəsindən asılı olmalıdır.

Turizm logistikasında yüksək səviyyədə təşkil olunmuş konkret və məqsədyönlü reklam işi də, bu sahə barədə olan məlumatların əhali arasında daha geniş yayılmasına və bu məsələ ilə bağlı onların hərtərəfli yararlanmasına geniş imkanlar açır. Məsələn, su və ya hava nəqliyyat növlərində endirimli tariflərin tətbiq olunmasına baxmayaraq, bu nəqliyyat vasitələrinin salonları sənişinlərlə tam dolmadan reysə çıxma halları da mövcud olur. Əslində bu nəqliyyat növlərinin gediş haqqında edilən endirimlər sənişinləri maraqlandırmalı və bu fürsətdən onlar yararlanmalı idilər [7, s. 111–119]. Ancaq, gediş haqqında edilən endirimlər barədə məlumatların məqsədyönlü reklam vasitəsilə əhaliyə çatdırılmaması səbəbindən həm əhali, həm də nəqliyyat müəssisələri ziyanə məruz qalırlar. Ona görə də turizm logistikasında istifadə edilən su (dəniz, çay, böyük su abarları və göl), dəmir yolu, hava və avtomobil nəqliyyat növlərinin reklamlarında istirahət məkanında turistlərin yerləşdirilmə imkanları (mehmanxanalarda və ya nəqliyyat vasitələrindəki imkanlara uyğun olaraq), səyahət qiymətləri, bu nəqliyyat növlərinə aid hərəkət vasitələrinin yola düşmə vaxtı və onların əsas hərəkət istiqamətləri boyunca turistləri maraqlandıracaq diqqətəlayiq yerlər barədə məlumatlar mütləq şərh olunmalıdır.

Nəticə. Turizmin nəqliyyat təminatı ilə məşğul olan nəqliyyat müəssisələrində həyata keçirilən daşımalardan nəqliyyat növlərinin fəaliyyətinin qiymətləndirilməsi, nəqliyyat xidmətlərini xarakterizə edən göstəricilərin yerinə yetirilmə səviyyəsinə görə aparılır. Ancaq nəzərə almaq lazımdır ki, nəqliyyat xidmətləri şəklində turizmin inkişaf etdirilmə maraqları, bir sıra plan göstəriciləri ilə ziddiyyətli formada özünü büruzə verir. Yuxarıda qeyd olunanlardan belə nəticə çıxarmaq olar ki, ümumilikdə və ya əksər hallarda sənişin daşımalarına xidmət edən bütün müəssisələrin işinin yekun maliyyə nəticəsi kimi irəli sürülən “sənişin nəqliyyatında ümumi iqtisadi səmərə” göstəricisinin planlaşdırılma prosesində nəzərə alınması məqsədəuyğun sayılmalıdır. Dövlət büdcəsinə sığorta yığımının məbləği, sənişin nəqliyyatının xidmət dəyərinin həyata keçirilməsinin nəticəsi kimi daxil olduğundan, onun rentabelliyyətinin müəyyən edilməsində bu məsələ mütləq nəzərə alınmalıdır. Əlbəttə ki, ümumi iqtisadi səmərəlilik göstəricisinin təbliğatının aparılması, sənişinlərə xidmət göstərmə prosesində iştirak edən bütün təsərrüfat bölmələrinin işinin ayrıca planlaşdırılması və qiymətləndirilməsi tələbini istisna etmir. Qeyd edilən təsərrüfat təcrübəsində ümumi iqtisadi səmərəlilik göstəricisinin istifadə olunması, sənişin nəqliyyat növlərində “sənişin nəqliyyatı” altsahəsinin təşkilati cəhətdən ayrılması məqsədəuyğun anlamına gətirib çıxarır. Bu baxımdan da, “ümumi iqtisadi səmərəlilik” göstəricisi turizm logistikası sahəsində də istifadə edilən bütün nəqliyyat növlərində tətbiq olunması məqsədəuyğun sayılmalıdır.

ƏDƏBİYYAT

1. Əhmədov H. M., Nəcəfov E. M., Kərimov B.Ə., Ağayev Ə.H. Nəqliyyat strukturunda logistikanın kompleks təminatı. Monoqrafiya. Bakı, MAA-nın Poliqrafiya Mərkəzi, 2018, 274 s.
2. Артемова Е.Н., Козлова В.А. Транспортное обслуживание туристов: учебно-методическое пособие для высшего профессионального образования / Е.Н. Артёмов, В.А. Козлова. Орёл: ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК», 2011, 140 с.
3. Rəhimov S.H. Turizm-ekskursiya işinin təşkili. Dərs vəsaiti. Bakı, Mütərcim, 2004. 312 s.
4. Ахмедов Г.М., Исмаилов И. И. Ахундов Г.Н. Меры эффективности использования различных видов транспорта при смягчении сезонного фактора в сфере туристической логистики. г. Рязань, Материалы международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Александра Алексеевича Сорокина «Современное состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса Российской Федерации», 24 января 2024 г., стр. 331–334.
5. Гуляев В.Г. Организация туристских перевозок. М.: Финансы и статистика, 2003, 302 с.

6. Əhmədov H.M. Yeni və perspektiv nəqliyyat növləri. Magistr hazırlığı üçün dərslik. Bakı, AzTU, 2014, 491 s.
7. Heydərov Ş.Ə. Turizmdə nəqliyyat xidmətlərinin təşkili. Dərs vəsaiti. "Mingəçevir Poliqrafiya Müəssisəsi" MMC, 2011, 148 s.

TURİZM LOGİSTİKASININ NƏQLİYYAT TƏMİNATINDAKI TƏSƏRRÜFATLARDAN KOMPLEKS İSTİFADƏ TƏDBİRLƏRİNİN GENİŞLƏNDİRİLMƏSİ

H.M.Əhmədov, Q.N.Axundov

Xülasə. Məqalədə turizmin nəqliyyat təminatı ilə məşğul olan nəqliyyat müəssisələrində həyata keçirilən daşıma-
lardan nəqliyyat növlərinin fəaliyyətinin qiymətləndirilməsi, nəqliyyat xidmətlərini xarakterizə edən göstəricilərin yerinə
yetirilmə səviyyəsinə görə aparıldığı qeyd edilməklə, nəqliyyat xidmətləri şəklində turizmin inkişaf etdirilmə maraq-
larının bir sıra plan göstəriciləri ilə ziddiyyətli formada çıxış etdiyi göstərilir. Sərnişin daşımalarına xidmət edən bütün
müəssisələrin işinin yekun maliyyə nəticəsi kimi irəli sürülən "sərnişin nəqliyyatında ümumi iqtisadi səmərə" göstəricisinin
planlaşdırılma prosesində nəzərə alınmasının da məqsəduyğun olduğu bildirilir. Qeyd edilən təsərrüfat təcrübəsində
ümumi iqtisadi səmərəlik göstəricisinin istifadə olunması, sərnişin nəqliyyat növlərində "sərnişin nəqliyyatı" altsahəsinin
təşkilati cəhətdən ayrılması tələbinin anlamına gətirib çıxarır. Bu baxımdan da, "ümumi iqtisadi səmərəlilik" göstəri-
cisinin turizm logistikası sahəsində də istifadə edilən bütün nəqliyyat növlərində tətbiq olunması təklif olunur.

Açar sözlər: turizm logistikası, turizmin nəqliyyat təminatı, nəqliyyat müəssisələri, nəqliyyat logistikası, "ümumi
iqtisadi səmərəlilik" göstəricisi.

Accepted: 25.11.2025

EXTENDING THE STRATEGIC DATA ALIGNMENT FRAMEWORK (SDAF): POLICY AND REGULATORY IMPLICATIONS OF BIG DATA GOVERNANCE IN CASPIAN BASIN PORTS

Rahid Zahid Alekberli

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan: ralekberli@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2332-9944>

Abstract. The Caspian Basin is becoming an essential hub in the Belt and Road Initiative (BRI) and the Trans-Caspian International Transport Route (TITR), linking Asian and European markets. While physical infrastructure in the region has advanced, regulatory and institutional frameworks for Big Data governance remain fragmented. This paper investigates the policy and regulatory implications of Big Data governance in Azerbaijan, Kazakhstan, Russia, Turkmenistan, and Iran, focusing on seaports as digital gateways to global supply chains. Through comparative policy analysis, cross-case coding, and benchmarking against international frameworks such as those of the European Union, the International Maritime Organization, and the World Trade Organization, four persistent challenges are identified: fragmented regulations, weak compliance, institutional limitations, and cybersecurity vulnerabilities. The study extends the Strategic Data Alignment Framework (SDAF) – originally designed to align corporate strategies with Big Data governance – into the policy-regulatory sphere. Findings show that regulatory convergence can serve as a strategic resource for Caspian ports. A five-point roadmap is proposed to promote harmonization, strengthen cybersecurity, and enhance digital corridor integration.

Keywords: *Big Data Governance; Caspian Basin Ports; Belt and Road Initiative (BRI); Trans-Caspian International Transport Route (TITR); Strategic Data Alignment Framework (SDAF); Regulatory Convergence; Maritime Cybersecurity; Port Community Systems.*

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

I. Introduction

The Caspian Basin has gained increasing importance as a strategic transport corridor, particularly within the framework of the Belt and Road Initiative (BRI) and the Trans-Caspian International Transport Route (TITR). Ports such as Baku in Azerbaijan, Aktau and Kuryk in Kazakhstan, and Astrakhan in Russia serve as gateways for Eurasian trade, connecting inland supply chains to global maritime networks. In parallel with infrastructure investments, effective digital governance has become essential to ensure interoperability, efficiency, and resilience of port operations [1], [2].

Despite this progress, the regulatory and institutional frameworks governing Big Data remain fragmented across the Caspian states. Different national strategies often lead to misalignment in data-sharing practices, inconsistent compliance with international standards, and vulnerabilities in cybersecurity systems [3 – 5]. These gaps hinder the development of trusted digital corridors and reduce the competitiveness of Caspian ports in comparison with their European and East Asian counterparts.

This paper addresses these gaps by extending the **Strategic Data Alignment Framework**—originally developed to align corporate strategies with Big Data governance [6] and further operationalized in practice [7] – into the policy and regulatory domain. By applying the SDAF lens at the state and regional level, the study investigates how regulatory convergence can function as a strategic resource for regional competitiveness.

The purpose of this research is to analyze the policy and regulatory implications of Big Data governance for Caspian Basin ports and propose a roadmap toward harmonization. The study applies comparative policy analysis and cross-case coding, benchmarked against the European Union’s *Digital Transport and Logistics Forum (DTLF)*, the International Maritime Organization’s *Facilitation (FAL) Convention*, and the World Trade Organization’s digital trade principles.

The central research question is: **How can harmonized Big Data governance frameworks enhance the competitiveness and global integration of Caspian Basin ports?**

By addressing this question, the paper contributes to both theory and practice. Theoretically, it extends SDAF to the policy-regulatory domain, while also framing regulatory convergence as a *valuable, rare, inimitable, and non-substitutable (VRIN)* resource under the Resource-Based View [8]. Practically, it provides a five-point roadmap for regional cooperation, aligning Caspian ports more closely with international digital trade standards.

II. Related Work

Big Data Governance in Ports

Big Data governance has become a central enabler of efficiency, competitiveness, and innovation in maritime transport. Studies emphasize that advanced data analytics and governance frameworks enhance decision-making, optimize resource allocation, and support business model innovation [9]. The digital transformation of maritime transport demonstrates how ports that successfully integrate Big Data into operations can achieve greater sustainability, agility, and resilience [10].

Comparative Governance Models

Global policy frameworks illustrate the benefits of regulatory harmonization. The European Union's Digital Transport and Logistics Forum (DTLF) promotes electronic documentation and interoperability across borders [11]. The International Maritime Organization's Facilitation (FAL) Convention similarly seeks to streamline reporting formalities and reduce data bottlenecks in shipping. Despite these efforts, emerging markets still face barriers including weak institutional capacity, siloed regulations, and inconsistent compliance [8].

Caspian Basin Challenges

The Caspian Basin presents unique institutional and regulatory complexities. Azerbaijan has adopted digital trade policies to strengthen its role as a logistics hub [1], while Kazakhstan's Aktau and Kuryk ports highlight the opportunities and vulnerabilities of relying on BRI digital platforms [2]. At the same time, smaller ports across the region face resource constraints and lack harmonized governance mechanisms [3], [4]. Concerns over data sovereignty further complicate cooperation, particularly in Russia and Iran [4].

Theoretical Framework: SDAF and RBV

The Strategic Data Alignment Framework was introduced by Alekberli [6] and Alekberli and Haussmann [7]. Alekberli [6] as a model to align corporate strategies with Big Data governance, addressing the gap between strategic intent and data management capabilities. This framework was further operationalized through practical guidelines by from Alekberli [6] and Alekberli and Haussmann [7], demonstrating its applicability to organizational settings in Caspian Basin ports. Building on this foundation, the present study extends SDAF into the policy-regulatory domain, exploring how alignment across states can generate systemic value.

From a theoretical standpoint, the Resource-Based View (RBV) provides additional grounding. Regulatory convergence is conceptualized here as a strategic asset that meets the VRIN criteria: valuable, rare, inimitable, and non-substitutable [8]. This perspective underscores the importance of harmonized governance as a driver of sustainable competitive advantage in regional port systems.

III. Methods (Research Methodology)

Research Design

This study adopts a **qualitative comparative policy analysis** to examine Big Data governance frameworks in the Caspian Basin. The design was chosen because the research question concerns institutional and regulatory alignment, which requires contextual interpretation of laws, strategies, and frameworks rather than purely quantitative indicators [12].

Data Sources

Primary sources of data included:

- **National strategies and policies:** Azerbaijan's Digital Trade Strategy, Kazakhstan's Digital Kazakhstan program, Russia's Digital Economy framework, Iran's ICT Roadmap, and Turkmenistan's transport modernization strategy [13–17].
- **Regional agreements:** TRACECA policy documents and Caspian Economic Forum resolutions [18].
- **International standards:** The EU's *Digital Transport and Logistics Forum (DTLF)*, the IMO's *Facilitation (FAL) Convention*, and WTO digital trade principles [19].

Secondary sources included peer-reviewed literature (2020–2024) addressing digitalization, port governance, and regional integration challenges [6], [7], [20].

Data Analysis

Policies were examined using **thematic coding** [21]. The following categories were applied:

1. **Data-sharing and interoperability**
2. **Compliance with international standards**
3. **Cybersecurity and data protection**
4. **Institutional cooperation and governance capacity**

Cross-case coding enabled comparison across Azerbaijan, Kazakhstan, Russia, Iran, and Turkmenistan [13–17].

Benchmarking

Each country's policies were benchmarked against international frameworks to measure the degree of alignment. EU DTLF served as the baseline for interoperability and electronic documentation; IMO FAL for facilitation standards; and WTO digital trade rules for transparency and cross-border exchange [13–17].

Validation

To enhance credibility, findings were reviewed with experts from Azerbaijan's Baku International Sea Trade Port and Kazakhstan's Aktau Port. Feedback was incorporated to refine coding and contextual interpretations [13–17].

Triangulation across national, regional, and international sources ensured reliability.

Theoretical Integration

The analysis was guided by the **Strategic Data Alignment Framework**, initially developed by Alekberli [6] and extended into practice by Alekberli and Haussmann [7]. Here, SDAF is adapted to assess policy-regulatory alignment, providing a structured lens for evaluating whether governance practices align with strategic trade objectives.

IV. Results

Regulatory Fragmentation

Comparative analysis revealed that each Caspian state has developed its own national digital strategies, but these remain largely **siload**. Azerbaijan emphasizes trade facilitation and digital customs integration, Kazakhstan focuses on embedding BRI platforms through *Digital Kazakhstan*, Russia enforces sovereignty-driven data policies, while Iran and Turkmenistan prioritize national security and state control. The absence of a **regional governance mechanism** prevents harmonization, causing duplication of reporting, increased transaction costs, and delays in port logistics [4], [22].

Weak Compliance with International Standards

Benchmarking against international frameworks demonstrated **partial and inconsistent adoption** of the IMO's *Facilitation (FAL) Convention* and the EU's *Digital Transport and Logistics Forum (DTLF)*. Azerbaijan has made progress with digital customs systems but remains limited in cross-border interoperability [23]. Kazakhstan has adopted select electronic documentation systems but lacks harmonization with EU standards [23]. Russia enforces localized compliance that diverges from international expectations, while Iran and Turkmenistan have yet to adopt structured compliance mechanisms [23].

Institutional Capacity Gaps

Small and medium-sized ports in the Caspian Basin continue to struggle with **institutional weaknesses** [23–25]. Case coding revealed limited digital expertise, insufficient budgets, and outdated IT systems. As a result, national strategies are not fully implemented at the operational level [3], [5]. Institutional inertia further slows adaptation to international standards, reducing the ability of Caspian ports to integrate into global trade networks.

Cybersecurity Vulnerabilities

Cybersecurity frameworks across Caspian states are **unevenly enforced**, creating risks for port operations. Russia prioritizes digital sovereignty, but its closed architecture limits cross-border data exchange. Azerbaijan and Kazakhstan have begun adopting international cyber norms, yet enforcement remains weak. Iran and Turkmenistan have security-centric systems that restrict cooperation. These fragmented approaches leave the region vulnerable to **cyberattacks, ransomware, and data breaches** in critical maritime infrastructure [26], [27].

Case Study Insights

- **Baku International Sea Trade Port (Azerbaijan):** Positioned as a smart logistics hub with growing investment in port community systems (PCS). However, lack of regional harmonization reduces its potential as a *digital corridor leader* [1].
- **Aktau and Kuryk Ports (Kazakhstan):** Benefit from integration with BRI trade corridors but remain **dependent on Chinese digital platforms**, creating sovereignty concerns and limiting interoperability with EU systems [2].
- **Astrakhan Port (Russia):** Operates under sovereignty-first governance, prioritizing national control over interoperability. This approach undermines cross-border data-sharing and weakens Russia's role in regional digital integration [4].

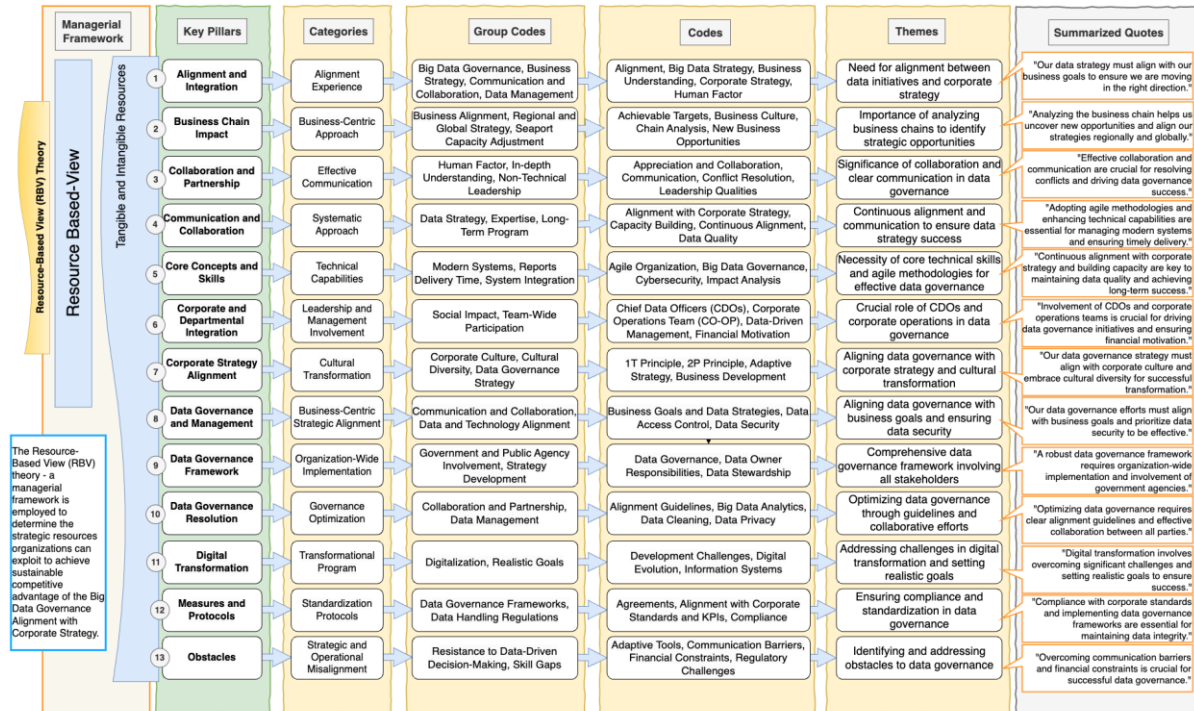
V. Discussion

SDAF as a Policy-Regulatory Framework

The results confirm that SDAF offers a robust foundation for assessing regulatory convergence in the Caspian Basin. Originally introduced by Alekberli [6] and Alekberli and Haussmann [7], to align corporate strategies with Big Data governance, and operationalized through applied guidelines by from Alekberli and Alekberli and Haussmann, the framework is extended here to the **policy and regulatory domain** [6], [7].

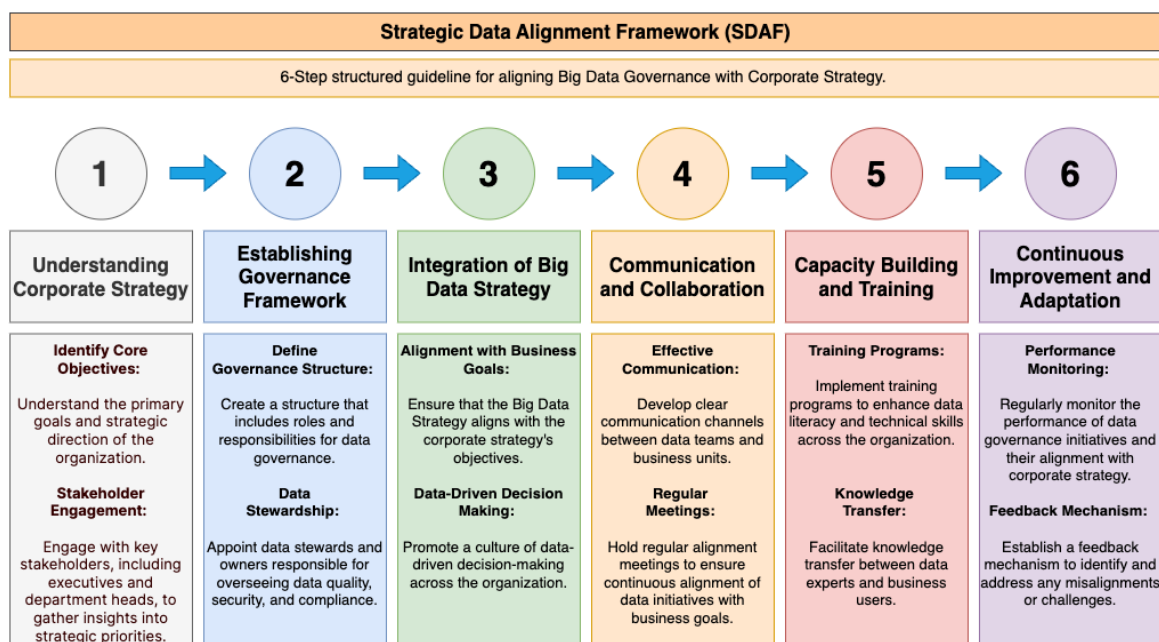
SDAF emphasizes four interdependent dimensions: **strategic alignment, governance mechanisms, institutional cooperation, and compliance standards**. When applied at the state and regional level, these dimensions highlight why Caspian states experience persistent fragmentation. Strategic priorities often diverge across countries, governance rules are inconsistent, institutions lack resources, and compliance with international standards remains partial [6], [7].

Structured Strategic Data Alignment Framework.



- Adapted from Alekberli and Alekberli and Haussmann [6], [7]. The framework illustrates how strategic alignment, governance mechanisms, institutional cooperation, and compliance standards interact when applied beyond the corporate level into regional policy contexts. Strategic Data Alignment Framework extended to policy and regulatory governance in the Caspian Basin.

Six-step SDAF guideline for aligning corporate strategy with Big Data governance



- Adapted from Alekberli and Alekberli and Haussmann [6], [7]. The guideline illustrates six sequential steps for implementing the Strategic Data Alignment Framework (SDAF): (1) defining strategic objectives, (2) mapping data governance priorities, (3) establishing regulatory and compliance mechanisms, (4) integrating institutional cooperation, (5) monitoring performance through digital metrics, and (6) continuous alignment and feedback. While originally developed for corporate environments, the model is extended here to the policy-regulatory domain of the Caspian Basin, providing a structured pathway for harmonized digital governance.

Structured Strategic Data Alignment guideline

This figure illustrates how SDAF provides a structured pathway from fragmented strategies to harmonized governance, emphasizing alignment as the bridge between national policies and global digital trade standards.

RBV Lens: Regulatory Convergence as a Strategic Resource

The Resource-Based View (RBV) provides additional theoretical grounding. Regulatory convergence meets the VRIN criteria [7], [8]:

- **Valuable:** It reduces costs, accelerates cargo clearance, and improves resilience.
- **Rare:** Few regional corridors achieve true regulatory harmonization.
- **Inimitable:** Convergence requires long-term cooperation and path dependency, making it difficult to replicate.
- **Non-substitutable:** No technical substitute exists for harmonized policy frameworks.

Thus, regulatory convergence can be conceptualized as a **strategic intangible resource**, enabling Caspian ports to achieve sustainable competitive advantage.

Policy Implications

The study's findings have significant implications for policymakers and regional stakeholders:

1. **Regional Coordination:** Establishing a Caspian Digital Port Forum would institutionalize dialogue and align digital strategies.
2. **Port Community Systems (PCS):** A regional PCS could reduce duplication and improve interoperability across borders.
3. **International Alignment:** Adoption of EU DTLF standards, IMO FAL requirements, and WTO digital trade principles would strengthen global trust.
4. **Cybersecurity Harmonization:** Shared frameworks for maritime cybersecurity would reduce vulnerabilities and enhance resilience.
5. **Pilot Cooperation Projects:** Joint initiatives—such as digital corridor pilots between Azerbaijan and Kazakhstan—would demonstrate feasibility and build momentum for broader reforms.

Together, these policy actions would not only reduce fragmentation but also position Caspian ports as **trusted digital corridors** linking the Belt and Road Initiative with the EU's TEN-T system.

Conclusion

This study examined the **policy and regulatory implications of Big Data governance** in the Caspian Basin, focusing on ports as strategic nodes within the Belt and Road Initiative (BRI) and the Trans-Caspian International Transport Route (TITR). Despite growing investments in physical infrastructure, the findings show that digital governance across the region remains fragmented. Divergent national policies, inconsistent compliance with international standards, limited institutional capacity, and cybersecurity vulnerabilities hinder the ability of Caspian ports to function as integrated digital corridors.

Theoretically, the paper makes two major contributions. First, it extends the **Strategic Data Alignment Framework**—originally developed to align corporate strat—into the policy and regulatory domain. Second, it reframes **regulatory convergence as a strategic VRIN resource** under the Resource-Based View [8], highlighting its potential to deliver sustainable competitive advantage for regional ports [6], [7].

Practically, the study proposes a **five-point roadmap**:

1. Establishing a Caspian Digital Port Forum.
2. Developing a regional Port Community System (PCS).
3. Aligning policies with EU, IMO, and WTO standards.
4. Implementing harmonized cybersecurity frameworks.
5. Launching pilot cooperation projects.

If adopted, these measures would position Caspian ports as **trusted digital corridors**, strengthening their integration into global supply chains and enhancing resilience in the face of geopolitical and technological challenges.

Future research should expand this analysis by incorporating **quantitative performance metrics**, exploring **comparisons with other regional corridors** such as the Black Sea or Adriatic, and conducting **longitudinal studies** to track the effectiveness of governance reforms over time.

Acknowledgment

The author gratefully acknowledges the institutional support of the Azerbaijan Technical University, which provided the academic foundation for this publication. Special thanks are extended to port authorities, policy experts, and industry practitioners from across the Caspian region, whose perspectives on Big Data governance and regulatory alignment offered valuable insights into both the opportunities and challenges facing regional integration.

In addition, the contributions of international experts and comparative policy discussions drawing on global best practices helped refine the analytical framework and situate the findings within a broader context of digital trade governance. Their combined experiences significantly strengthened the practical recommendations and the policy roadmap proposed in this paper.

REFERENCES

1. Bayramov A. Conflict, cooperation or competition in the Caspian Sea region: A critical review of the New Great Game paradigm. *Caucasus Survey*, vol. 9, no. 1, pp. 1–20, Oct. 2021, doi: 10.1080/23761199.2020.1774856.
2. Palu R., Hilmola O.-P. Future potential of trans-caspian corridor. *Logistics*, vol. 7, no. 3, p. 39, 2023, doi: 10.3390/logistics7030039.
3. Clemente D., Cabral T., Rosa-Santos P., Taveira-Pinto F. Blue seaports: the smart, sustainable and electrified ports of the future. *Smart Cities*, vol. 6, no. 3, Art. no. 3, June 2023, doi: 10.3390/smartcities6030074.
4. Novikau A. Energy security in security studies: A systematic review of twenty years of literature. *CEJISS*, vol. 0, no. 0, Dec. 2022, doi: 10.51870/PDDC2102.
5. Jović M., Tijan E., Brčić D., Pucihar A. Digitalization in Maritime Transport and Seaports: Bibliometric, Content and Thematic Analysis. *JMSE*, vol. 10, no. 4, p. 486, Apr. 2022, doi: 10.3390/jmse10040486.
6. Alekberli (Alakbarli) R. Integrating Big Data Governance and Corporate Strategies in Small and Medium Caspian Basin Seaports. *Walden Dissertations and Doctoral Studies*, Sept. 2024, [Online]. Available: <https://scholarworks.waldenu.edu/dissertations/16316>
7. Alekberli R.Z., Haussmann R. E. Integrating Big Data Governance and Corporate Strategies in Small and Medium Caspian Basin Seaports. In *2024 IEEE Global Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT)*, Nov. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/GCAIoT63427.2024.10833594.
8. Wernerfelt B. A resource-based view of the firm. *Strat. Mgmt. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 171–180, Apr. 1984, doi: 10.1002/smj.4250050207.
9. Ciampi F., Marzi G., Demi S., Faraoni M. The big data-business strategy interconnection: a grand challenge for knowledge management. A review and future perspectives. *JKM*, vol. 24, no. 5, pp. 1157–1176, June 2020, doi: 10.1108/JKM-02-2020-0156.

10. Tijan E., Jović M., Aksentijević S., Pucihar A. Digital transformation in the maritime transport sector. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 170, p. 120879, Sept. 2021, doi: 10.1016/j.techfore.2021.120879.
11. De La Peña Zarzuelo I., Freire Soeane M.J., López Bermúdez B. Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review. *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 20, p. 100173, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jii.2020.100173.
12. Flick U. *An introduction to qualitative research*, 7th edition. Los Angeles: SAGE, 2023.
13. Kazakhstan. Digital Kazakhstan | Electronic government of the Republic of Kazakhstan. Accessed: Oct. 16, 2025. [Online]. Available: <https://egov.kz/cms/en/digital-kazakhstan>
14. Lowry A. Russia's Digital Economy Program: An Effective Strategy for Digital Transformation?. In *The Palgrave Handbook of Digital Russia Studies*, D. Gritsenko, M. Wijermars, and M. Kopotev, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 53–75. doi: 10.1007/978-3-030-42855-6_4.
15. Shamizanjani M. et al. *Digital Iran-National Roadmap Executive Summary 2020-2025*. 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.23344.99840.
16. TEIF 2025. Transport and Transit Corridors. Accessed: Oct. 16, 2025. [Online]. Available: <https://teif-turkmenistan.com/en/sectortest/4>
17. President of the Republic of Azerbaijan. “Azərbaycan Respublikasında Rəqəmsal İnkişaf Konsepsiyası”nın təsdiq edilməsi haqqında Azərbaycan Respublikası Prezidentinin Fərmanı “Digital Development Concept in the Republic of Azerbaijan,” vol. 287. 2025. Accessed: Sept. 14, 2025. [Online]. Available: <https://president.az/az/articles/view/67937>
18. UNECE. 2023 SPECA Economic Forum. 2023 SPECA Economic Forum. Accessed: Oct. 16, 2025. [Online]. Available: <https://unece.org/speca/events/2023-speca-economic-forum>
19. Digital Transport and Logistics Forum (DTLF) - Mobility and Transport. Accessed: Oct. 16, 2025. [Online]. Available: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/digital-transport-and-logistics-forum-dtlf_en
20. Alekberli R. Developing a Data-Driven Radio Frequency Administration for Spectrum-Sharing, Strategic Utilization and Sharing-Readiness in Azerbaijan as a Case Example. Master's Thesis, The University of Liverpool (United Kingdom), 2019. Accessed: Jan. 27, 2025. [Online]. Available: <https://search.proquest.com/openview/6925c6af1de3bc498adc7bec4c5747ad/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
21. Saldana J. The coding manual for qualitative researchers. pp. 1–440, 2021, Accessed: July 13, 2024. [Online]. Available: <https://www.torrossa.com/en/resources/an/5018667>
22. Sarkar B.D., Shankar R., Kar A.K. Port logistic issues and challenges in the Industry 4.0 era for emerging economies: an India perspective. *Benchmarking: An International Journal*, vol. 30, no. 1, pp. 50–74, Jan. 2022, doi: 10.1108/BIJ-08-2021-0499.
23. Yermekbayev A., Delovarova L., Kaliyeva A. Trans-Caspian International Transport Route: A Kazakhstani Perspective on Challenges, Opportunities, and Prospects. *International Journal*, vol. 79, no. 2, pp. 312–329, June 2024, doi: 10.1177/00207020241257636.
24. Abdullayev K., Hasanov P., Aliyeva A., Aliyeva N., Mustafayev A. The non-oil sector of the Republic of Azerbaijan's economy: Prospects and directions for development within the framework of contemporary economic policy. *ED*, vol. 23, no. 4, pp. 82–94, Oct. 2024, doi: 10.57111/econ/4.2024.82.
25. Guliyev T. Assessing economic diversification opportunities and challenges: The case of Azerbaijan.
26. Ogbuke N.J., Yusuf Y.Y., Dharma K., Mercangoz B.A. Big data supply chain analytics: ethical, privacy and security challenges posed to business, industries and society. *Production Planning & Control*, vol. 33, no. 2–3, pp. 123–137, Feb. 2022, doi: 10.1080/09537287.2020.1810764.
27. Drazovich L., Brew L., Wetzel S. Advancing the state of maritime cybersecurity guidelines to improve the resilience of the maritime transportation system. In *2021 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR)*, Rhodes, Greece: IEEE, July 2021, pp. 503–509. doi: 10.1109/CSR51186.2021.9527922.

Accepted: 11.11.2025

HYBRID FUZZY–EVOLUTIONARY FRAMEWORK FOR MULTI-CRITERIA DRUG SELECTION IN PERSONALIZED MEDICINE

Javid Yashar Abbasli

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan: cavid.abbasli@aztu.edu.az

<https://orcid.org/0009-0005-8982-0164>

Abstract. Personalized drug selection requires balancing therapeutic efficacy, adverse events, drug interactions, and cost–objectives that are inherently conflicting. This study proposes a hybrid architecture integrating Mamdani fuzzy inference, ensemble machine learning, NSGA-II optimization, and Fuzzy DIBR II ranking for multi-objective pharmacotherapy. The Mamdani system encodes eight clinical safety rules to filter unsuitable patient-drug pairs based on renal and hepatic function. Random Forest and XGBoost models trained on 44,692 pairs achieve AUC-ROC of 0.871 and 0.907 for efficacy and adverse event prediction, respectively. NSGA-II generates nine unique Pareto-optimal prescriptions over 30 generations. Fuzzy DIBR II elicits criterion weights from physician preferences modeled as triangular fuzzy numbers ($\sigma = 0.7$), yielding $w_1 = 0.387$ (efficacy), $w_2 = 0.302$ (safety), $w_3 = 0.205$ (interactions), $w_4 = 0.105$ (cost). The top-ranked prescription achieves 84.4% efficacy, 39.4% adverse events, 11.6% interaction severity, and 608.60 AZN cost. Results demonstrate clinically interpretable multi-criteria recommendations with explicit trade-off quantification.

Keywords: multi-objective optimization, fuzzy inference, NSGA-II, fuzzy DIBR II; personalized medicine.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Introduction. Clinical pharmacotherapy is a complex multi-criteria decision problem that requires clinicians to simultaneously balance therapeutic efficacy, adverse event risk, drug–drug interactions, and treatment cost while respecting patient-specific physiological constraints [1]. Existing drug selection practices rely mainly on clinical guidelines and physician experience, typically optimizing one dominant criterion and handling the others implicitly or via ad hoc rules [2].

Multi-objective optimization offers a principled way to generate sets of Pareto-optimal prescriptions that represent distinct trade-off strategies instead of enforcing fixed preferences a priori. Evolutionary algorithms such as NSGA-II provide efficient search and diversity maintenance, but by themselves do not address two key clinical requirements: enforcing patient-specific safety constraints and translating Pareto sets into actionable recommendations aligned with uncertain clinician preferences. Fuzzy logic and fuzzy MCDM methods are well-suited to encode linguistic clinical knowledge and model uncertainty, while ensemble machine learning can provide robust data-driven predictions of efficacy and adverse events.

This study proposes a hybrid five-stage decision-support architecture that integrates Mamdani fuzzy safety filtering, ensemble machine learning (Random Forest and XGBoost) for patient-specific outcome prediction, NSGA-II-based multi-objective optimization, and Fuzzy DIBR II for uncertainty-aware preference modeling [3]. Personalized drug selection is formulated as a constrained four-objective problem that maximizes efficacy and minimizes adverse events, drug–drug interaction severity, and cost under fuzzy safety constraints [4]. Experimental evaluation on a synthesized data yet clinically realistic dataset with 1,000 patients and 50 drugs shows that the framework can generate diverse Pareto-optimal multi-drug prescriptions and rank them into clinically interpretable strategies, with the top solution achieving high predicted efficacy while maintaining acceptable safety and cost.

Related works. Multi-objective evolutionary algorithms have been used in healthcare for problems such as radiotherapy planning, chemotherapy scheduling, and dose optimization, where trade-offs between tumor control and toxicity are critical. These studies demonstrate the value of Pareto-based optimization but typically treat continuous dosing variables, rely on deterministic objective functions, and do not incorporate patient-specific pharmacological safety constraints or discrete multi-drug selection. Fuzzy logic has a long history in medical diagnosis and risk assessment, enabling robust handling of imprecise laboratory values and linguistic clinical rules [5]. Mamdani-type fuzzy systems and neuro-fuzzy models have achieved high diagnostic accuracy [6, pp. 177–179]. Several studies have shown that Random Forest, gradient boosting and graph-based models can accurately predict drug response and adverse events from clinical and omics data.

Multi-criteria decision-making methods such as AHP, TOPSIS, PROMETHEE, and their fuzzy extensions have been applied to drug and health technology evaluation, showing how structured criteria weighting can support formulary and reimbursement decisions [7]. However, these methods usually rely on precise or simple fuzzy weights and do not explicitly represent uncertainty in preference ratios. The DIBR family introduces ratio-based weight elicitation with a stronger theoretical basis and recent fuzzy extensions, but has not yet been applied to pharmacotherapy to jointly capture uncertainty in fuzzy preference ratios.

Mathematical modelling of multi-criteria drug selection. Let $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ denote the set of available drugs and p a fixed patient. A prescription is represented by a binary decision vector $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \{0,1\}^n$, where $x_i = 1$ indicates that the drug d_i is included in the regimen and $x_i = 0$ otherwise. The number of selected drugs is constrained by the cardinality condition

$$1 \leq \|\mathbf{x}\|_1 = \sum_{i=1}^n x_i \leq 5 \quad (1)$$

reflecting clinical practice in which only a limited number of concurrent medications is acceptable. For each patient-drug pair (p, d_i) a fuzzy safety system produces a scalar safety score $S_{\text{fuzzy}}(p, d_i) \in [0,1]$. This score combines age, renal and hepatic function, and drug-specific toxicity into a continuous measure of suitability. The following hard safety constraint is imposed, $S_{\text{fuzzy}}(p, d_i) \geq \tau_{\text{safety}}, \forall i$ such that $x_i = 1$, where $\tau_{\text{safety}} = 0.5$ is a clinically chosen threshold.

Drugs violating this inequality are excluded from any admissible prescription. The quality of a prescription $\mathbf{x}$ is assessed through four criteria: expected therapeutic efficacy, risk of adverse events, severity of drug-drug interactions, and total treatment cost. These are modeled as objective functions $f_j(\mathbf{x}), j = 1, \dots, 4$, to be minimized simultaneously.

Machine learning models provide patient-specific probabilities $\hat{P}_{\text{eff}}(p, d_i)$ of achieving sufficient clinical response and $\hat{P}_{\text{se}}(p, d_i)$ of experiencing a clinically relevant adverse event. Let $\mathcal{J}(\mathbf{x}) = \{i: x_i = 1\}$ denote the index set of selected drugs. The first two objectives are defined as

$$f_1(\mathbf{x}) = -\frac{1}{|\mathcal{J}(\mathbf{x})|} \sum_{i \in \mathcal{J}(\mathbf{x})} \hat{P}_{\text{eff}}(p, d_i), \quad (2)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \frac{1}{|\mathcal{J}(\mathbf{x})|} \sum_{i \in \mathcal{J}(\mathbf{x})} \hat{P}_{\text{se}}(p, d_i), \quad (3)$$

so that minimizing f_1 corresponds to maximizing mean efficacy, whereas minimizing f_2 reduces the average probability of adverse events across all prescribed drugs. Potential pharmacological conflicts between drugs are modeled through a symmetric interaction matrix – drug-drug interaction - $\text{DDI} \in [0,1]^{n \times n}$, where DDI_{ij} quantifies the normalized severity of the interaction between drugs d_i and d_j . For any prescription containing at least two drugs, the interaction objective is

$$f_3(\mathbf{x}) = \frac{2}{|\mathcal{J}(\mathbf{x})|(|\mathcal{J}(\mathbf{x})| - 1)} \sum_{\substack{i, j \in \mathcal{J}(\mathbf{x}) \\ i < j}} \text{DDI}_{ij}, \quad (4)$$

representing the mean pairwise interaction severity; for single-drug prescriptions, $f_3(\mathbf{x})$ is set to zero.

Let $C(d_i) > 0$ denote the monetary cost of the drug d_i and C_{ref} a reference value used for normalization (in the experiments, $C_{\text{ref}} = 200$ AZN). The cost objective is given by

$$f_4(\mathbf{x}) = \frac{1}{C_{\text{ref}}} \sum_{i \in \mathcal{J}(\mathbf{x})} C(d_i), \quad (5)$$

which scales the total cost to a dimensionless quantity of order one, facilitating joint optimization with the other criteria. The multi-criteria drug selection problem for a patient p can therefore be written compactly as the constrained multi-objective program,

$$\min_{\mathbf{x} \in \{0,1\}^n} \mathbf{F}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x}), f_4(\mathbf{x})]^T \quad (6)$$

$$1 \leq \|\mathbf{x}\|_1 \leq 5, S_{\text{fuzzy}}(p, d_i) \geq \tau_{\text{safety}}, \forall i \in \mathcal{J}(\mathbf{x}). \quad (7)$$

A prescription $\mathbf{x}^{(1)}$ is said to Pareto-dominate another prescription $\mathbf{x}^{(2)}$ if

$$f_j(\mathbf{x}^{(1)}) \leq f_j(\mathbf{x}^{(2)}), \forall j \in \{1,2,3,4\}, \quad (8)$$

and the inequality is strict for at least one objective. The set of all non-dominated feasible prescriptions constitutes the patient-specific Pareto set. Subsequent sections describe how this formal model is instantiated within a hybrid fuzzy-evolutionary decision-making framework that generates, evaluates, and ranks Pareto-optimal multi-drug prescriptions.

Hybrid fuzzy–evolutionary decision-making framework. The fuzzy safety module employs triangular membership functions defined as:

$$\text{tri}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{if } x < a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{if } b \leq x \leq c; \\ 0, & \text{if } x > c; \end{cases} \quad (9)$$

where $a \leq b \leq c$ represent the lower bound, modal value, and upper bound, respectively. Three input linguistic variables are defined as $x_{\text{age}} \in [18,90]$ years for a lifetime, $x_{\text{GFR}} \in [15,120]$ mL/min/1.73m² for **Glomerular Filtration Rate (GFR)** and, $x_{\text{AST}} \in [10,150]$ U/L for **Aspartate Aminotransferase (AST)**. Each variable uses three fuzzy sets with triangular membership functions in Table 1.

Table 1

Partitioning of variables into three fuzzy sets using triangular membership functions

Lifetime	GFR	AST
$\mu_{\text{young}}(x) = \text{tri}(x; 18,18,40)$	$\mu_{\text{poor}}(x) = \text{tri}(x; 15,15,45)$	$\mu_{\text{normal}}(x) = \text{tri}(x; 10,10,40)$
$\mu_{\text{middle}}(x) = \text{tri}(x; 30,55,70)$	$\mu_{\text{moderate}}(x) = \text{tri}(x; 35,60,85)$	$\mu_{\text{elevated}}(x) = \text{tri}(x; 30,60,90)$
$\mu_{\text{elderly}}(x) = \text{tri}(x; 60,90,90)$	$\mu_{\text{normal}}(x) = \text{tri}(x; 75,120,120)$	$\mu_{\text{high}}(x) = \text{tri}(x; 80,150,150)$

The output variable, safety score $s \in [0,1]$, is partitioned into three fuzzy sets, $\mu_{\text{unsafe}}(s) = \text{tri}(s; 0,0,0.4)$, $\mu_{\text{marginal}}(s) = \text{tri}(s; 0.3,0.5,0.7)$ and, $\mu_{\text{safe}}(s) = \text{tri}(s; 0.6,1.0,1.0)$. The knowledge base consists of eight IF-THEN rules encoding clinical safety constraints:

1. **R₁**: IF age is young AND GFR is normal AND AST is normal THEN safety is safe
2. **R₂**: IF age is elderly AND GFR is poor THEN safety is unsafe
3. **R₃**: IF GFR is poor AND AST is high THEN safety is unsafe
4. **R₄**: IF age is middle AND GFR is moderate AND AST is elevated THEN safety is marginal
5. **R₅**: IF age is young AND GFR is poor THEN safety is marginal
6. **R₆**: IF age is elderly AND GFR is normal AND AST is normal THEN safety is safe
7. **R₇**: IF age is middle AND GFR is normal THEN safety is safe
8. **R₈**: IF age is elderly AND AST is high THEN safety is unsafe

For the input tuple $(x_{\text{age}}, x_{\text{GFR}}, x_{\text{AST}})$, the firing strength α_k of rule R_k is computed using the minimum t-norm:

$$\alpha_k = \min\{\mu_{A_{k1}}(x_{\text{age}}), \mu_{A_{k2}}(x_{\text{GFR}}), \mu_{A_{k3}}(x_{\text{AST}})\} \quad (10)$$

where A_{ki} denotes the antecedent fuzzy set for the variable i in rule k . The aggregated output membership function is obtained via maximum aggregation:

$$\mu_{\text{agg}}(s) = \max_{k=1 \dots 8} \{\min(\alpha_k, \mu_{C_k}(s))\} \quad (11)$$

where C_k is the consequent fuzzy set of the rule k . Centroid defuzzification produces the crisp base safety score:

$$s_{\text{base}} = \frac{\int_0^1 s \cdot \mu_{\text{agg}}(s) ds}{\int_0^1 \mu_{\text{agg}}(s) ds} \approx \frac{\sum_{j=1}^N s_j \cdot \mu_{\text{agg}}(s_j)}{\sum_{j=1}^N \mu_{\text{agg}}(s_j)} \quad (12)$$

where $N = 1000$ discretization points are used for numerical integration. The base safety score is adjusted for drug-specific toxicity profiles:

$$s_{\text{fuzzy}}(p, d) = \max\{0, s_{\text{base}} - \Delta(p, d)\} \quad (13)$$

where the penalty term is:

$$\Delta(p, d) = \beta_1 T_{\text{nephro}}(d) \cdot \mathbb{I}(x_{\text{GFR}} < 60) + \beta_2 T_{\text{hepato}}(d) \cdot \mathbb{I}(x_{\text{AST}} > 60) + \beta_3 T_{\text{terato}}(d) \cdot \mathbb{I}_{\text{pregnant}} \quad (14)$$

with penalty coefficients, $\beta_1 = 0.5$, $\beta_2 = 0.6$, $\beta_3 = 1.0$ and $T(d) \in \{0,1\}$ indicating drug toxicity characteristics. For each safety-eligible patient–drug pair (p, d) , a 10-dimensional feature vector is constructed:

$$\mathbf{z} = [\text{age}, \text{BMI}, \text{GFR}, \text{AST}, \text{HbA1c}, \text{severity}, E_{\text{base}}(d), R_{\text{base}}(d), C(d), \text{class}(d)]^T \quad (15)$$

where patient features include age, body mass index (BMI), glomerular filtration rate (GFR), aspartate aminotransferase (AST), glycated hemoglobin (HbA1c), and disease severity grade. Additionally, drug features comprises on baseline efficacy $E_{\text{base}}(d)$, baseline adverse event risk $R_{\text{base}}(d)$, and cost $C(d)$. A Random Forest classifier with $T = 100$ decision trees and maximum depth $h_{\text{max}} = 20$ predicts the probability of high efficacy:

$$\hat{P}_{\text{eff}}(\mathbf{z}) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T h_t(\mathbf{z}) \quad (16)$$

where $h_t: \mathbb{R}^{10} \rightarrow \{0,1\}$ is the t -th decision tree trained on a bootstrap sample via Gini impurity minimization:

$$\text{Gini}(S) = 1 - \sum_{c=0,1} \left(\frac{|S_c|}{|S|} \right)^2 \quad (17)$$

for a node sample set S with class subsets S_0 and S_1 . An XGBoost classifier with $K = 100$ boosting iterations, maximum depth 6, and learning rate $\eta = 0.1$ models adverse event probability:

$$\hat{P}_{\text{se}}(\mathbf{z}) = \sigma\left(\sum_{k=1}^K f_k(\mathbf{z})\right) \quad (18)$$

where $\sigma(\cdot)$ is the sigmoid function, and f_k minimizes the regularized objective:

$$\mathcal{L}^{(k)} = \sum_{i=1}^{n_{\text{train}}} \ell(y_i, \hat{y}_i^{(k-1)} + f_k(\mathbf{z}_i)) + \gamma T_{\text{leaves}} + \frac{\lambda}{2} \sum_{j=1}^{T_{\text{leaves}}} w_j^2 \quad (19)$$

with logistic loss:

$$\ell(y, \hat{y}) = -y \log(\sigma(\hat{y})) - (1 - y) \log(1 - \sigma(\hat{y})) \quad (20)$$

complexity penalty γ , and L^2 regularization parameter λ . For two candidate solutions $\mathbf{x}^{(1)}$ and $\mathbf{x}^{(2)}$, solution $\mathbf{x}^{(1)}$ Pareto-dominates $\mathbf{x}^{(2)}$ (denoted $\mathbf{x}^{(1)} < \mathbf{x}^{(2)}$) if and only if:

$$f_j(\mathbf{x}^{(1)}) \leq f_j(\mathbf{x}^{(2)}) \text{ for all } j \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (21)$$

$$\exists k \in \{1, 2, 3, 4\}: f_k(\mathbf{x}^{(1)}) < f_k(\mathbf{x}^{(2)}) \quad (22)$$

Let $\mathcal{F}_r$ denote the set (front) of solutions that share the same non-domination rank r , where rank is computed with respect to all objective values $\{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x}), f_4(\mathbf{x})\}$ in the current population. The first front $\mathcal{F}_1$ thus contains all non-dominated solutions, i.e., all $\mathbf{x}$ for which there exists no other solution $\mathbf{y}$ such that $\mathbf{y} < \mathbf{x}$. Non dominated sorting iteratively identifies $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2 \dots$ by counting, for each solution, how many other solutions dominate it and grouping solutions with the same rank into the corresponding front $\mathcal{F}_r$. For solution i in front $\mathcal{F}$, the crowding distance CD_i quantifies how isolated this solution is from its neighbors in objective space:

$$CD_i = \sum_{j=1}^4 \frac{f_j(i+1) - f_j(i-1)}{f_j^{\max} - f_j^{\min}} \quad (23)$$

where, within front $\mathcal{F}$, solutions are sorted by objective j , $f_j(i+1)$ and $f_j(i-1)$ denote the objective values of the immediate neighbors of solution i along dimension j , and boundary solutions in $\mathcal{F}$ receive $CD_i = \infty$ to ensure their preservation. For this, NSGA-II operates with a population size $N_{\text{pop}} = 50$ and evolves over $G = 30$ generations [8]. Each individual is represented as a binary vector of length equal to the number of safety-eligible drugs for the patient. Each individual is initialized by randomly selecting 1–5 drugs from the safety-eligible set. Binary tournament selection based on non-domination rank and crowding distance [9, pp. 45–52]. Bit-flip mutation with probability $p_m = 0.3$. If the mutation violates cardinality constraints ($\|\mathbf{x}\|_1 \notin [1, 5]$), the offspring is rejected. Combined parent and offspring populations are sorted by non-domination rank and crowding distance; the top N_{pop} solutions survive to the next generation.

Physician preferences over criteria $\{C_1, C_2, C_3, C_4\} = \{\text{Efficacy, Safety, Interactions, Cost}\}$ are modeled via pairwise preference ratios represented as triangular fuzzy numbers:

$$\tilde{\theta}_{ij} = (\theta_{ij}^l, \theta_{ij}^m, \theta_{ij}^u) \quad (24)$$

with confidence-dependent bounds:

$$\theta_{ij}^l = \theta_{ij}^m(1 - 0.2\sigma), \theta_{ij}^u = \theta_{ij}^m(1 + 0.2\sigma) \quad (25)$$

where $\sigma \in [0, 1]$ quantifies preference certainty. The preference ordering Efficacy $>$ Safety $>$ Interactions $>$ Cost is encoded with modal values $\theta_{12}^m = 1.3$, $\theta_{23}^m = 1.5$, $\theta_{34}^m = 2.0$, and confidence parameter $\sigma = 0.7$. For DIBR II weight computation, cumulative preference ratios are computed via fuzzy multiplication [10, pp. 72–96]:

$$\tilde{\theta}_{13} = \tilde{\theta}_{12} \otimes \tilde{\theta}_{23}, \tilde{\theta}_{14} = \tilde{\theta}_{13} \otimes \tilde{\theta}_{34} \quad (26)$$

Fuzzy weights are derived from the preference structure:

$$\tilde{w}_1 = [\tilde{1} \oplus \tilde{\theta}_{12}^{-1} \oplus \tilde{\theta}_{13}^{-1} \oplus \tilde{\theta}_{14}^{-1}]^{-1} \quad (27)$$

$$\tilde{w}_j = \tilde{w}_{j-1} \oslash \tilde{\theta}_{(j-1)j}, j = 2, 3, 4 \quad (28)$$

where $\oslash$ denotes fuzzy division. Graded mean defuzzification converts fuzzy weights to crisp values:

$$GM(\tilde{A}) = \frac{a_l + 4a_m + a_u}{6} \quad (29)$$

Normalized crisp weights are obtained via [11]:

$$w_j = \frac{GM(\tilde{w}_j)}{\sum_{k=1}^4 GM(\tilde{w}_k)} \quad (30)$$

For each Pareto solution i , objectives are normalized via min–max scaling [12]:

$$\bar{d}_{ij} = \frac{d_{ij} - d_j^{\min}}{d_j^{\max} - d_j^{\min}} \text{ if } C_j \text{ is benefit criterion} \quad (31)$$

$$\bar{d}_{ij} = \frac{d_j^{\max} - d_{ij}}{d_j^{\max} - d_j^{\min}} \text{ if } C_j \text{ is cost criterion} \quad (32)$$

where d_{ij} is the value of the criterion j for solution i . The final aggregated score is:

$$\text{Score}_i = \sum_{j=1}^4 w_j \bar{d}_{ij} \quad (33)$$

As a result of DIBR II weight ranking, solutions are ranked in descending order of Score_i , with the top-ranked prescription representing the optimal balance of all criteria under the specified physician preferences [13].

Experimental results. The proposed hybrid framework was evaluated on a synthetic clinical dataset constructed to emulate realistic pharmacotherapy scenarios under full experimental control. The dataset comprises 1,000 patients with clinically plausible distributions for age, BMI, GFR, AST, and HbA1c, and 50 drugs defined by baseline efficacy, adverse event risk, cost, binary toxicity indicators, and a symmetric drug–drug interaction matrix representing low to moderate interaction severity. Applying the Mamdani fuzzy safety filter with threshold $\tau_{\text{safety}} = 0.5$ to all 50,000 patient–drug pairs yielded 44,692 safety-eligible combinations, which were split 80/20 into 35,754 training and 8,938 test instances for ensemble modelling, with predictive performance summarized in Table 2.

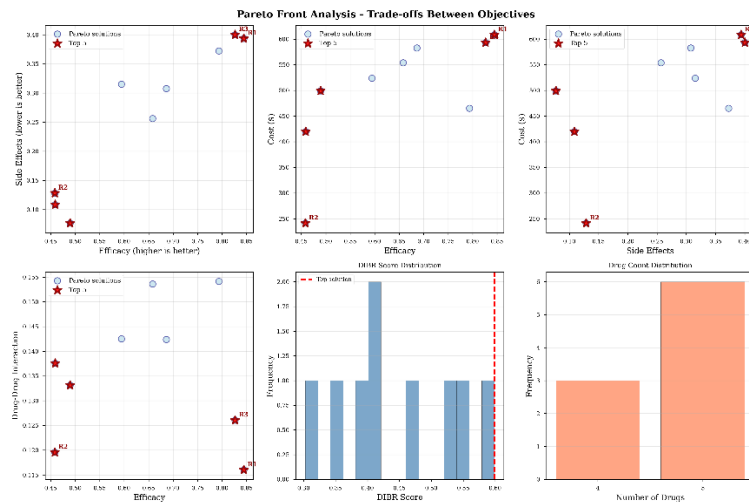
A representative test patient with age 62.5 years, GFR 63.1 mL/min/1.73m², and AST 10.0 U/L was selected for detailed analysis. Fuzzy safety assessment indicated that all 50 drugs satisfied the safety threshold for this patient, enabling exploration of the full drug space. NSGA-II was executed with population size $N_{\text{pop}} = 50$ for $G = 30$ generations. The evolutionary process exhibited consistent improvement in Pareto front quality, with the hypervolume indicator increasing from 0.412 (generation 1) to 0.584 (generation 30), indicating effective convergence and diversity maintenance. The final population contained 20 non-dominated solutions in the raw Pareto front. Application of duplicate removal based on binary prescription vector comparison reduced this to 9 unique Pareto-optimal prescriptions, representing a 55% duplication rate typical of evolutionary algorithms on discrete combinatorial problems.

Table 2

Predictive Performance of Ensemble Machine Learning Models

Model	Task	AUC-ROC	Accuracy	Precision	Recall
Random Forest	Efficacy	0.871	0.794	0.782	0.801
XGBoost	Adverse Events	0.907	0.829	0.815	0.838

In the figure given below, illustrates key trade-offs on the Pareto front between efficacy, safety, and cost. High-efficacy prescriptions (efficacy > 0.80) show increased adverse event risk ($\approx 0.35\text{--}0.42$), whereas ultra-safe options (adverse events < 0.15) reach only moderate efficacy ($\approx 0.45\text{--}0.50$). High-efficacy regimens are also more expensive ($\approx 550\text{--}610$ AZN), while lower-cost alternatives (<250 AZN) do not systematically worsen safety, and all prescriptions keep drug–drug interaction severity below 0.15, reflecting the moderate interaction matrix.



Pareto Front Analysis – Trade-offs Between Objectives

Drug count analysis shows that 4- and 5-drug regimens dominate the Pareto set (7 of 9 solutions), indicating that multi-drug combinations provide better coverage of the objective space. Physician preferences were modeled via fuzzy triangular numbers with the ordering Efficacy > , Safety > , Interactions > Cost, and confidence parameter $\sigma = 0.7$, yielding crisp weights $w_1 = 0.387$, $w_2 = 0.302$, $w_3 = 0.205$, $w_4 = 0.105$, which emphasize efficacy and safety while assigning lower importance to cost. The top five Pareto-optimal prescriptions, together with their objective values and qualitative clinical interpretations, are summarized in Table 3.

Table 3

Top Five Prescription Recommendations with Clinical Profiles

Rank	DIBR Score	Efficacy	Adverse Events	DDI	Cost (AZN)	Drugs	Clinical Profile
1	0.599	84.4%	39.4%	11.6%	608.6	5	High-efficacy, aggressive
2	0.545	45.8%	12.9%	12.0%	241.2	4	Budget-constrained
3	0.525	82.6%	40.0%	12.6%	593.3	5	High-efficacy alternative
4	0.478	48.9%	7.7%	13.3%	499.2	5	Ultra-safe, elderly
5	0.417	45.9%	10.9%	13.8%	419.8	5	Balanced, general use

Quantitative analysis of the Pareto front confirms fundamental trade-offs in multi-criteria drug selection. The efficacy–safety relationship shows a strong negative correlation (Spearman $\rho = -0.78$, $p < 0.01$), where increasing mean efficacy from 45% to 85% leads to a 3.1-fold rise in adverse event probability (from 12.9% to 40.0%). The efficacy–cost correlation is moderate ($\rho = 0.61$, $p = 0.03$), with high-efficacy solutions (>80%) costing on average $2.4\times$ more than moderate-efficacy regimens (<50%), whereas safety and cost are only weakly correlated ($\rho = 0.23$, $p = 0.18$), indicating that budget limits do not inherently require higher adverse event risk. Drug–drug interaction severity remains relatively uniform (coefficient of variation 18.3%), suggesting that the interaction matrix design and cardinality constraints effectively restrict harmful combinations across Pareto-optimal prescriptions.

Conclusion and future works. This study presented a hybrid decision-support framework for multi-criteria drug selection that jointly optimizes efficacy, safety, drug–drug interactions, and cost at the individual patient level. The architecture combines a Mamdani fuzzy safety filter, ensemble machine learning for outcome prediction, NSGA-II for multi-objective optimization, and Fuzzy DIBR II for preference-based ranking, yielding interpretable Pareto-optimal prescriptions instead of a single opaque recommendation. Experimental evaluation on a synthesized data but clinically realistic dataset demonstrated that the framework can generate diverse treatment options with clearly quantified trade-offs aligned with physician priorities. Future work will include validation on real-world electronic health record and prescription data to better capture rare adverse events and complex interaction patterns, as well as the development of interactive tools for dynamic physician preference elicitation. Further research directions involve integrating uncertainty-aware or robust optimization techniques and extending the framework to high-risk, polypharmacy-intensive domains such as oncology.

REFERENCES

1. World Health Organization. Medication Safety in Polypharmacy, Technical Report WHO/UHC/SDS/2019.11, 2019.
2. Bates D.W., Cullen D.J., Laird N., Petersen L.A., Small S.D., Servi D., Laffel G., Sweitzer B.J., Shea B.F., Hallisey R. Incidence of adverse drug events and potential adverse drug events, JAMA, 1995, vol.274(1), pp.29–34.
3. Topol E.J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence, Nature Medicine, 2019, vol.25(1), pp.44–56.
4. Shortliffe E.H., Sepúlveda M.J. Clinical decision support in the era of artificial intelligence, JAMA, 2018, vol.320(21), pp.2199–2200.
5. Zadeh L.A. Fuzzy sets, Information and Control, 1965, vol.8(3), pp.338–353.
6. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2010, 607 p.
7. Innocent P.R., John R.I. Computer aided fuzzy medical diagnosis, Information Sciences, 2004, vol.162(2), pp.81–104.
8. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, vol.6(2), pp.182–197.
9. Coello C.A.C., Lamont G.B., Van Veldhuizen D.A. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems, 2nd ed., Springer, 2007, 800 p.
10. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, Springer-Verlag, 1981, 269 p.
11. Breiman L. Random forests, Machine Learning, 2001, vol.45(1), pp.5–32.
12. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system, Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016, pp.785–794.
13. Mardani A., Jusoh A., Zavadskas E.K. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014, Expert Systems with Applications, 2015, vol.42(8), pp.4126–4148.

Accepted: 18.12.2025

MİKRODALĞA DİAPAZONUNDA İŞLƏYƏN FAZLAŞDIRILMIŞ ANTENA QƏFƏSİNİN MODELƏŞDİRİLMƏSİ

Məmməd Aydın oğlu Abdullayev

Azərbaycan Texnologiya Universiteti, Gəncə, Azərbaycan

MODELING OF A PHASED ANTENNA ARRAY OPERATING IN THE MICROWAVE RANGE

Mammad Aydin Abdullayev

Azerbaijan Technological University, Ganja, Azerbaijan: m.abdullaev98@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-8727-2345>

Abstract. Models of the ring antenna array were developed and the main characteristics of this antenna array were analyzed. The results obtained suggest that the considered variants of the microwave ring antenna array with discrete scanning of azimuthal radiation patterns, taking into account weight, dimensions and electrical characteristics, look promising for use in equipment of radiocommunication, radar and radio control systems. Also, a method for correcting the distortions of the direction diagrams of the ring antenna array, formed as a result of the interaction, was proposed. To implement this technique, an algorithm was developed for changing the amplitude distribution of the electromagnetic field strength from the phase distribution of the electromagnetic field strength to compensate for the distortion of the parameters resulting from the deviation in the radiation diagram.

Keywords: antenna array, microwave range, directivity diagram, gain coefficient, modeling.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Giriş

Müasir dövrdə müxtəlif sahələrində müxtəlif texniki vasitə və sistemlər geniş tətbiq olunur [1, 2]. Bir tərəfdən radio ilə idarə olunan müxtəlif bazalara malik pilotsuz nəqliyyat vasitələri, digər tərəfdən isə Wi-Max standartının genişzolaqlı naqilsiz girişinə əsaslanan radio sistemləri xüsusilə seçilir. Tamamilə fərqli görünən bu vasitə və sistemlərə maraq, radiokanalların həm pilotsuz nəqliyyat vasitələrinin radioidarəetmə sistemlərində, həm də genişzolaqlı naqilsiz çıxış üçün radio sistemlərində istifadəsi ilə əlaqədardır. Buna görə də, bu sistemlərin etibarlılığı və işləmə keyfiyyəti təkcə faktiki qəbuledici radio avadanlığının xüsusiyyətlərindən deyil, həm də antena qidalandırıcı qurğularının parametrləri – şüalanma diaqramlarının quruluşu və xarakteristikaları, gücləndirmə əmsalları və antenanın şüalanma diaqramlarına nəzarət imkanları ilə sıx bağlıdır. Pilotsuz uçuş aparatlarının idarəetmə və rabitə sistemlərinin, eləcə də genişzolaqlı naqilsiz çıxış sistemlərinin avadanlıqlarında müxtəlif antenalar istifadə olunur [3, 4]. Bu antenalar həm məkan üzrə sabit olan dairəvi, sektor və iynə formalı şüalanma diaqramlarına, həm də elektriklə idarə olunan şüalanma diaqramına malik ola bilər.

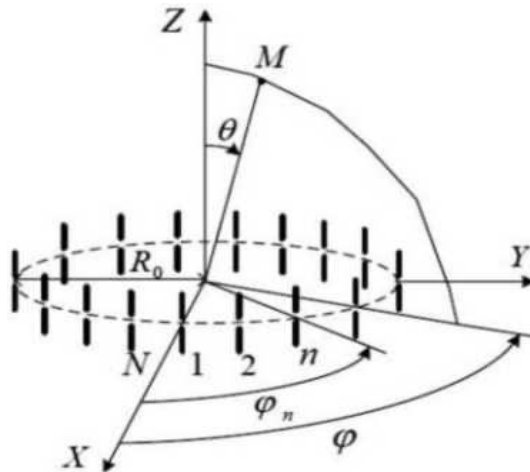
İdarəetmə və rabitə sistemlərinin avadanlıqlarına qoyulan çəki, ölçü və qiymət tələblərinin, eləcə də bu sistemlərin tezlik genişliyi, səs-küy səviyyəsi və müdaxiləyə davamlılığı, həmçinin funksionallığına artan ehtiyac, antena texnologiyalarının daim təkmilləşdirilməsini zəruri edir. Bu kontekstdə xüsusi maraq doğuran halqa antena qəfəsləri, dairəvi, çoxşüalı, sabit və skan edən sektor tipli şüalanma diaqramlarının formalaşdırılmasına imkan verir. Bu da bəzi tətbiq sahələrində sabit şüalanma diaqramına malik antenaların uşurla əvəz olunmasını təmin edir.

Burada stasionar və mobil genişzolaqlı naqilsiz giriş avadanlıq sistemlərində, həmçinin radionəzarət və pilotsuz nəqliyyat vasitələrinin rabitə sistemlərində istifadə üçün nəzərdə tutulmuş azimutal şüalanma diaqramlarını elektrik siqnalları ilə dəyişdirilən mikrodalğalı dairəvi antena qəfəsləri işləni b hazırlanması və tədqiqi olmuşdur. Aşağıda müzakirə olunan dairəvi antena qəfəsləri 3,4-3,7 QHz tezlik diapazonu üçün hazırlanmışdır.

Dairəvi antena qəfəsinin modeləşdirilməsi

Dairəvi antena qəfəsi, silindrik antena qəfəsinin yalnız bir səviyyədə yerləşən şüalandırıcı elementlərdən ibarət variantı kimi nəzərdən keçirilə bilər (şəkil 1).

Adi passiv dairəvi antenna qəfəsinin azimut müstəvisində şüalanma diaqramlarının elektrik skanı adətən aşağıdakı üsullarla həyata keçirilir: fazalı antenna qəfəslərinin faza dəyişdiricilərinin tətbiqi [5, 6], xüsusi matris və ya linzalar vasitəsilə müəyyən istiqamətdə şüalandırıcı sahələrin mərhələli tənzimlənməsi, eksklüziv şüalanma və linzaların seçilməsi, həmçinin diskret keçidli skan sistemində malik dairəvi antenna qəfəslərində soyuducuların istifadəsi. Bundan əlavə, passiv halqalı mikrodalğalı antenna qəfəslərinin iki variantı nəzərdən keçirilir: idarə olunan faza dəyişdiricilərinə istifadə edərək şüalanma diaqramlarının faza skanlama ilə, şəkil 2, a və keçid elementləri əsasında qurulmuş açarlardan istifadə etməklə, şəkil 2, b.



Şəkil 1. Dairəvi antenna qəfəsi

Dairəvi simmetriya sayəsində halqa antenna qəfəsləri demək olar ki, dairəvi (qəfəs müstəvisində) şüalanma diaqramları əldə etməyə, həmçinin 314° daxilində XOY müstəvisində skan edildikdə forması dəyişməz saxlanıla bilən skan bucağı sektoru və ya hətta iynəşəkilli şüalanma diaqramları yaratmağa imkan verir [7]. Mikrodalğalı dairəvi fazalı antenna qəfəsləri çox kiçik bucaq addımı ilə şüalanma diaqramlarının dairəvi skanını (yönləndirməni) təmin edə bilər [8].

Eyni zamanda, ənənəvi fazalı antenna qəfəslərinin ciddi çatışmazlıqları da mövcuddur – mikrodalğalı yarımkeçirici faza dəyişdiricilərində yüksək istilik itkisi, bu da fazalı antenna qəfəslərinin səmərəliliyini və gücləndirmə qabiliyyətini məhdudlaşdırır, həmçinin idarəetmə sisteminin mürəkkəbliyinə səbəb olur [9].

Diskret keçidli şüalanma diaqramı skanına malik halqa antenna qəfəsləri daha sadə idarəetmə sistemində, açarlarda daha az istilik itkilərinə, buna müvafiq olaraq daha yüksək səmərəlilik və gücləndirmə qabiliyyətinə malikdir. Lakin bu qəfəslər, qəfəs elementlərinin sayından asılı olaraq müəyyən bucaq addımı ilə diskret skan təmin edir. Bununla belə, bu xüsusiyyət belə halqa antenna qəfəslərinin bir çox real idarəetmə və rabitə sistemlərində istifadəsinə mane olmur [10].

Burada mikrodalğalı dairəvi antenna qəfəslərinin iki variantının işlənilib hazırlanması və simulyasiya nəticələri təqdim olunur: şaquli asimmetrik vibratorlardan ibarət 8 və 16 elementli aşağıprofilli halqa antenna qəfəsləri və xətti zolaqlı antenna qəfəslərindən ibarət 8 elementli halqa antenna massiv qəfəsi. Dairəvi antenna qəfəsləri azimutal istiqamətdə ən azı 6-8 dB gücləndirmə əmsalı əldə etmək üçün hesablanmışdır.

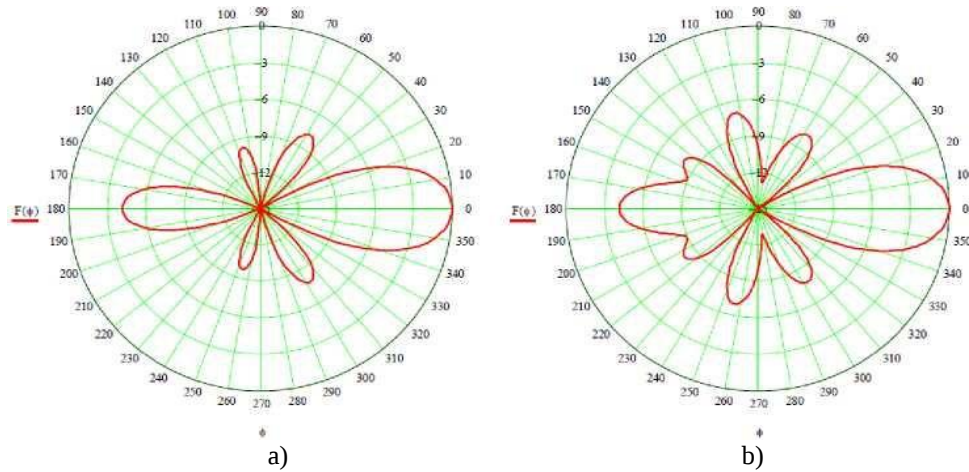
Vibratorlardan ibarət dairəvi mikrodalğalı antenna qəfəsi şəkil 3-də təsvir edilmişdir, burada: 1 – ekran; 2 – silindrik reflektor; 3 – şüalandırıcı; 4 – koaksial birləşdirici; R_e – ekran radiusudur; R_p və H_p – reflektorun radiusu və hündürlüyü; R_i koordinatların başlanğıcından emitentin şaquli oxuna qədər olan məsafədir; θ və φ müşahidə M nöqtəsinə istiqaməti təyin edən meridional və azimutal bucaqlardır (M' – M nöqtəsinin XOY üfüqi müstəvisinə proyeksiyasıdır).

Dairəvi antenna qəfəsinin dizayn parametrləri [11, 12]-də təsvir olunan metod əsasında hesablanmışdır. Bu zaman nəzərə alınmışdır ki, məsələn, azimutal müstəvidə şüalanma diaqramlarının diskret

Figure 1 consists of two circuit diagrams, (a) and (b), showing different internal topologies for an 8-port network. Both diagrams are based on an 8-port star topology with ports numbered 1 to 8. In diagram (a), the internal structure includes a 'phase shifter' and 'power dividers'. In diagram (b), the internal structure includes 'power dividers' and 'switch' components.

96

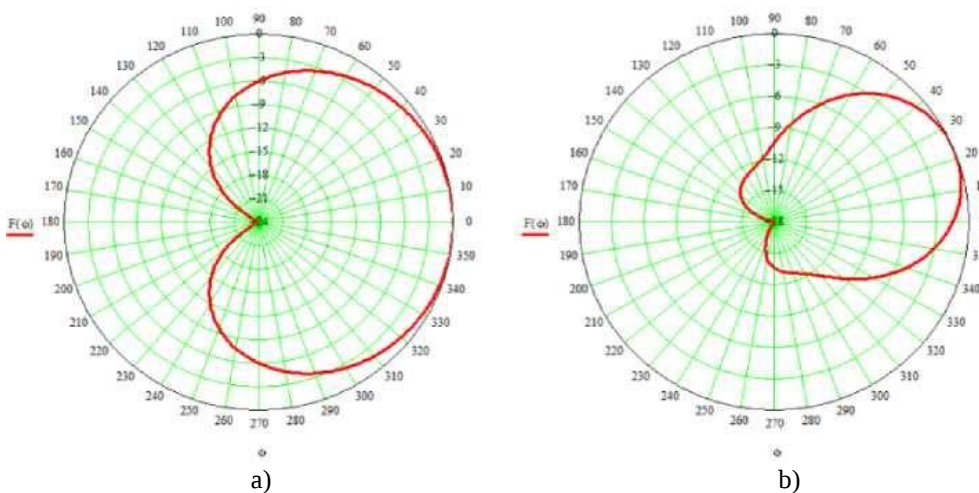
ötürücü kanalında yan şüalanma səviyyəsini aşağı saxlamaq baxımından qəbuledilməzdir. Təbii ki, halqa antenna qəfəsinin elementlərinin qeyri-bərabər həyəcanlanması halında daimi yan şüalanma səviyyəsi azaldıla bilər [3, 4]. Lakin bu halda şüaformalaşdırma sisteminin əhəmiyyətli dərəcədə mürəkkəbləşməsi və nəticədə antenna şüalanma gücünün azalması baş verəcək.



Şəkil 4. Halqa antenna qəfəsinin istiqamətlilik diaqramlarının nümunələri: dairəvi şüalanma diaqramına malik şüalandırıcılardan ibarət variant (a) və kardiod şüalanma diaqramına malik şüalandırıcılardan ibarət variant (b)

Şəkil 5-də kardiod şüalanma diaqramına malik şüalandırıcılardan ibarət səkkiz elementli halqa antenna qəfəsinin şüalanma diaqramları göstərilmişdir. Hesablamalar halqa antenna qəfəsində bir və iki qonşu şüalandırıcının eyni amplitud və fazalı cərəyanla həyəcanlandırılması halı üçün aparılmışdır.

Şəkil 5-dən göründüyü kimi: bir şüalandırıcı həyəcanlandırıldıqda, şüalanma diaqramının eni 134° təşkil edir. İki şüalandırıcı həyəcanlandırıldıqda, şüalanma diaqramı 66° -yə qədər daralır və arxa istiqamətdə dərin sönmələr müşahidə edilir. Üç şüalandırıcı həyəcanlandırıldıqda, şüalanma diaqramı 54° -yə qədər daralır, bu isə dairəvi antenna qəfəsinin istiqamətliliyini artırır, lakin idarəetmə sxeminin xeyli mürəkkəbləşməsinə səbəb olur.



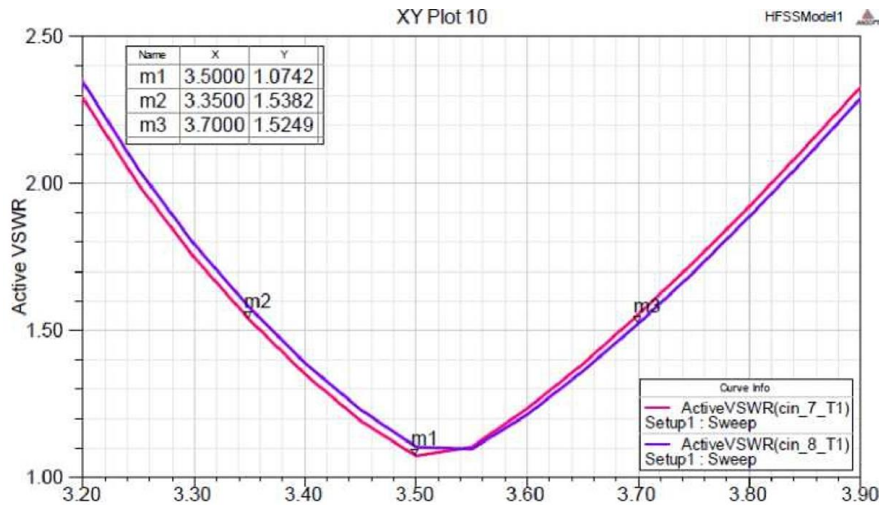
Şəkil 5. Halqavari antenna qəfəsinin şüalanma diaqramları: bir aktiv şüalanma (a) və iki bitişik aktiv şüalanma ilə (b)

Beləliklə, sektoral (bucaqlı aralıqda) şüalanma diaqramlarının skan edilməsi rejimində praktiki istifadəyə gəldikdə, qonşu şüalandırıcı cütlərinin həyəcanlandırılması rejimində işləyən diskret keçidli skana malik halqa antenna qəfəsi daha cəlbedici görünür. Xüsusilə də mikrodalğa açarlarındakı istilik itkilərinin faza dəyişdiricilərindəkindən bir neçə desibel daha az olması bu variantı üstün edir.

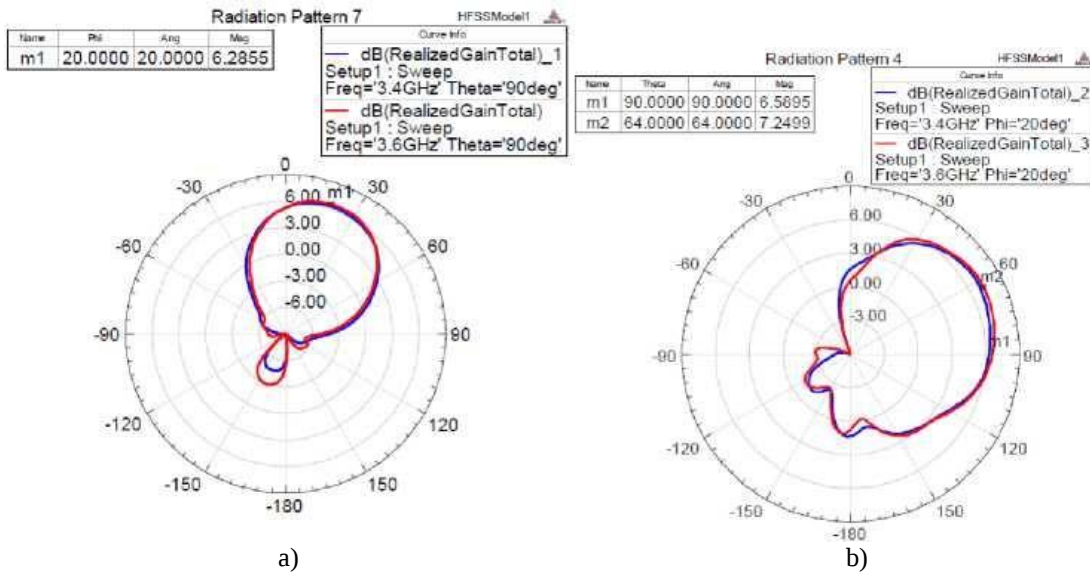
Halqa antenna qəfəs modelinin parametrləri: 3,5 QHs orta tezlik üçün radiusunun hesablanmış qiyməti $R_i = 47 \text{ mm}$; reflektordan emitentin şaquli oxuna qədər olan məsafə ($\lambda_{\min}/4$) 21 mm; reflektorun radiusu $R_p = 26 \text{ mm}$; şüalandırıcının şaquli oxundan ekranın kənarına qədər olan məsafə ($\lambda_{\min}/4$) 21 mm; ekran radiusu $R_e = 68 \text{ mm}$; reflektor hündürlüyü H_p 1,2 $\lambda_{\min}/4 = 31,5 \text{ mm}$ -ə bərabər götürülür. Vibrator elementlərinin nominal giriş müqaviməti 50 Om-dur.

Simulyasiya HFSS proqramı vasitəsilə həyata keçirilmişdir. Şəkil 6-da həlqəvi antenna qəfəsinin bir cüt bitişik aktiv elementinin aktiv durğun dalğa nisbətinin tezlik xüsusiyyətləri göstərilir (uyğun yüklər qalanların girişlərinə bağlıdır). Bu halda minimum dayanıqlı dalğa nisbəti = 1,07 orta iş tezliyində əldə edilir və 3,36-3,68 QHs tezlik diapazonunda daimi dalğa nisbəti 1,5-dən çox deyil.

Bir cüt aktiv element (1 və 2) vəziyyətində dairəvi antenna qəfəsinin şüalanma diqaramarı şəkil 7-də göstərilmişdir. Şəkil 7, a-da göstərilən azimut şüalanma sxemlərinə əsasən görünür ki, şüalanma sxemlərinin eni təxminən 65° təşkil edir ki, bu da ən azı 4,5 dB gücləndirmə əmsalı səviyyəsində skan edərkən qonşu azimut istiqamətlərində şüalanma diqaramalarının üst-üstə düşməsi üçün kifayət qədərdir. Bu halda, azimut müstəvisində həlqəvi antenna qəfəsinin gücləndirmə əmsalı 6,2 dB təşkil edir, maksimum qiymət (7,2 dB) 26° yüksəklik bucağı ilə əldə edilir (şəkil 7, b).



Şəkil 6. Dairəvi antenna qəfəsinin iki bitişik aktiv elementinin girişlərində aktiv durğun dalğa əmsalının tezlik xüsusiyyətləri



Şəkil 7. İki aktiv element üçün 3,4 və 3,6 QHs tezliklərdə həlqəvi antenna qəfəsinin azimutal (a) və meridional (b) şüalanma nümunələri

Əldə edilən nəticələrə əsasən belə qənaətə gəlmək olar ki, yuxarıda müzakirə olunan vibrator-dan ibarət halqa antenna qəfəsləri mobil Wi-Max sistemində abunəçi terminal antenası kimi istifadə edilə bilər. Bu, şüalanma diaqramlarının baza stansiyasına yönəldilmiş vəziyyətdə saxlanmasını təmin etmək üçün nəzərdə tutulur. Bundan əlavə, yerüstü və hava pilotsuz uçuş aparatlarının idarəetmə sistemlərinin avadanlıqlarında, nisbətən kiçik gücləndirmə əmsalı tələb olunan hallarda effektiv tətbiq edilə bilər. Gücləndirmə əmsalı 8-10 dB-dən yüksək olan və aşağı yan şüalanma səviyyəsinə malik antenalara ehtiyac duyulan hallarda, meridional müstəvidə şüalanma diaqramlarının daralmasını təmin edən və bununla da istiqamətliklik və gücləndirmə əmsalını artıran şaquli antenna qəfəslərindən ibarət halqa antenna qəfəslərinin istifadəsi məqsədəuyğundur.

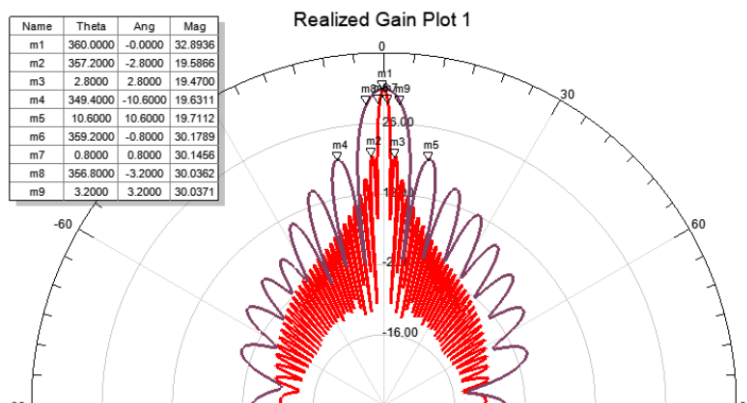
3,4-3,6 QHs tezlik diapazonu üçün nəzərdə tutulmuş mikrodalğalı zolaqlı halqa massivi, şüalanma diaqramını bucaqlı aralıqda skan edən rejimində ən azı 14 dB gücləndirmə əldə etmək üçün dizayn edilmişdir. Bu məqsədlə, halqa antenna qəfəsi bucaqlı aralıqla kollinear antenalar şəklində düzülmüş səkkiz elementdən ibarətdir.

Dairəvi halqa antenna qəfəsi sisteminin əmsalı (dairəvi antenna qəfəsindəki bütün şüalandırıcı elementlərin birgə təsirini müəyyən edən ədədi və ya riyazi faktor), bütün fərdi şüalandırıcı elementlərin elektromaqnit sahələrinin toplanması yolu ilə hesablanır. Bu halda, halqa antenna qəfəsinin müstəvisində yerləşən və koordinatları x_n, y_n olan hər bir element üçün faza yerdəyişməsi aşağıdakı düstur əsasında müəyyən edilir:

$$\psi_{xy} = 57,3 \cdot k \cdot (x_n \cdot \sin(\nu) \cdot \cos(\nu) \cdot \sin(\varphi)), \quad (1)$$

burada k dalğa ədədi; x_n, y_n – müvafiq olaraq X oxu (azimut müstəvisi) və Y oxu boyunca (yüksəklik müstəvisi) şüalandırıcının yerləşdiyi koordinatlar; φ – y və z oxları arasındakı bucaq, vektor yz müstəvisinə proyeksiyaya ortoqonaldır; ϑ – x oxu ilə yz müstəvisi arasındakı bucaqdır.

Elektrik skan etmənin antenna qəfəsinin parametrlərinə təsirinin təhlili yastı çox elementli aktiv fazalı antenna qəfəsləri üzərində aparılmışdır. Qəfəs diskret faza dəyişdiriciləri ilə signal ötürmə yollarından istifadə edir, diskretlik dərəcəsi 5,625 dərəcədir. Təhlil sonlu elementlər metodundan istifadə etməklə kompüter dəstəklili dizayn sistemində aparılmışdır. Aşağıda analizin qrafik formada nəticələri təqdim olunur: bərabər faza paylanmasına malik halqa antenna qəfəsinin hesablanmış şüalanma diaqramları şəkil 8-də göstərilmişdir. Hündürlük müstəvisində nəticələr təqdim olunmamışdır, çünki texniki spesifikasiyaya əsasən, kənara çıxırma ± 10 dərəcə daxilində tələb olunur və nəticədə əlavə tənzimləmə tələb olunmur.



Şəkil 8. Bərabər faza paylanması ilə antenna qəfəsinin şüalanma diaqramı

Şəkil 8-də azimut və yüksəklikdə 9 QHs tezliyində antenna qəfəsinin şüalanma diaqramının bölmələri göstərilmişdir. Yüksəklikdə şüalandırıcıların sayının az olması səbəbindən sonrakı analizlər yalnız azimutda aparılmışdır. Göründüyü kimi, əsas şüa normadan kənara çıxdıqda şüalanma sxeminin xüsusiyyətləri dəyişir.

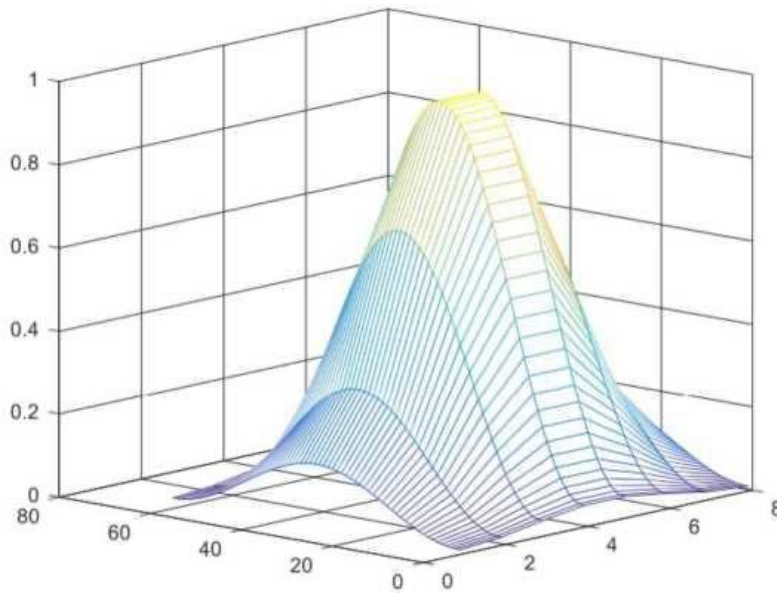
Şəkil 8-dən göründüyü kimi, elektron skanlama nəticəsində şüasının normadan kənara çıxması əsas şüalanma diaqramının eninə və daimi yan şüalanma səviyyələrinə birbaşa təsir göstərir. Şüa 60 dərəcəyə qədər yerdəyişdikdə qazanc 6,45 dB azalır, yan şüalanma səviyyəsi 1 dB pisləşir və 0,5 səviyyəsində əsas şüalanma səviyyəsinin eni iki dəfədən çox artır.

Şüalanma diaqramının xarakteristikalarını düzəltmək üçün, elektromaqnit sahəsinin intensivliyinin “kosinus kvadratı üzərində baza” amplitud paylanması istifadəsi təklif edilir, çünki bu üsul baza hündürlüyünün seçilməsi baxımından ən çevik metoddur:

$$A_n m = \left(\Delta x + (1 - \Delta x) \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi n}{N-1} \right) \right) \times \left(\Delta y + (1 - \Delta y) \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi m}{M-1} \right) \right), \quad (2)$$

burada $\Delta x, \Delta y$ – müvafiq olaraq x və y oxları boyunca postamentin hündürlüyü; n, m – müvafiq olaraq x və y oxları boyunca yerləşən emitentlərin mərkəzləri arasındakı məsafədir; N, M – müvafiq olaraq x və y oxları boyunca yerləşən şüalandırıcıların sayıdır.

Amplitud paylanmasının antenanın xarakteristikalarına təsirini təhlil etmək üçün X oxu boyunca postamentin sabit qiymətləri götürüldü: 0,5; 0,3; 0,15; 0,1; Y oxu boyunca: 0,5; 0,3; 0,1; 0,05; 0,01. Şəkil 9-da altıq üzərində kvadrat kosinus amplitud paylanmasının qrafik təsviri göstərilmişdir.



Şəkil 9. Altıq üzərində kvadrat kosinus amplitud paylanmasının qrafik təsviri

Bərabər faza paylanması üçün postamentdə ilkin kosinus-kvadrat amplitud paylanmasını müəyyən etmək, sonra şüa fırlanması üçün hesablanmış faza paylanmalarının xüsusiyyətlərinin təhrifini təhlil etmək lazımdır. Hər bir şüa istiqaməti üçün postament hündürlüyü seçimi antena şəbəkəsinin son xüsusiyyətlərini təyin edəcəkdir.

Şəkil 9-dan belə nəticə çıxır ki, qaldırma müstəvisində mövcud olan şüalandırıcıların sayı (8 ədəd) amplituda paylanmalarının tətbiq imkanlarını məhdudlaşdırır. Şüalanma diaqramının düzəlişlərinin dəqiqliyini artırmağın bir yolu şüalandırıcıların sayını artırmaqdır.

Nəticə

Həlqəvi antena qəfəsinin modelləri hazırlanmış və bu antena qəfəsinin əsas xarakteristikalarının təhlili aparılmışdır. Alınmış nəticələr onu deməyə əsas verir ki, çəki, ölçü və elektrik xüsusiyyətləri nəzərə alınmaqla azimutal şüalanma sxemlərinin diskret skanlanması ilə mikrodalğalı halqa antena

qəfəsinin nəzərdən keçirilən variantları radiorabitə, radiolokasiya və radionəzarət sistemlərinin avadanlıqlarında istifadə üçün perspektivli görünür. Həm də hazırlanmış həlqəvi antena qəfəsinin istiqamətlənmə diaqramlarının təhriflərinin aradan qaldırılması üçün üsul təklif edilmişdir. Bu texnikanı həyata keçirmək üçün istiqamətlənmə diaqramında təhrifləri kompensasiya etmək üçün elektromaqnit sahəsinin gücünün amplitud paylanması elektromaqnit sahəsinin gücünün faza paylanmasıdan dəyişdirilməsi alqoritmi hazırlanmışdır.

ƏDƏBİYYAT

1. Pinuela M., Mitcheson P.D., Lucyszyn S. Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(7), pp. 2715-2726.
2. Prabhu P., Poongodi C., Sarwesh P., Shanmugam A. Design a low profile printed monopole antenna for RFID applications. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, 2013, 2(2), pp. 454-459.
3. Resti M.M., Kurvinen J., Ala-Laurinaho J., Khripkov A., Ilvonen J., Wouterghem J., Viikari V. Dual-Polarized mm-Wave Endfire Chain-Slot Antenna for Mobile Devices. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(1), pp. 25-34.
4. Gyoungdeuk K., Kim D., Lim K., Yang C., You C., Kim S. Dual-Band and Dual-Polarized Rhombic Patch Antenna Array for 5G mmWave RF Front End Antenna-in-Package Module. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(7), pp. 2120-2124.
5. Hong W. The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications. *IEEE J. Microw.*, 2021, 1(1), pp. 101-122.
6. Xia R.L., Qu S.W., Li P.F., Jiang Q., Nie Z.P. An efficient decoupling feeding network for microstrip antenna array. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2015, 14, pp. 871-874.
7. Caratelli D., Toso G., Stukach O.V., Panokin N.V. Deterministic constrained synthesis technique for conformal aperiodic linear antenna arrays-Part I: theory. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(9), pp. 5951-5961.
8. Changwu T., Yang N., Leung K.W., Liu G. Design of MIMO Antennas with DRAs and a Dual-Function Decoupling/Radiating Monopole Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(4), pp. 3874-3885.
9. Charles A.G., Guo Y. A General Approach for Synthesizing Multibeam Antenna Arrays Employing Generalized Joined Coupler Matrix. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 256, pp. 7556-7564.
10. Ao L., Kwal-Man L. Single-layer wideband end-fire dual-polarized antenna array for device-to-device communication in 5G wireless systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(5), pp. 5142-5150.
11. Avishek D., Durbadal M., Rajib K. An optimal circular antenna array design considering the mutual coupling employing ant lion optimization. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2021, 13(2), pp. 164-172.
12. Barannikov I.A., Berdnikov K.A., Derevyankin S.I., Ishchenko E.A., Smuseva K.V., Fyedorov S.M. Reflector antenna based on SIW technology. *Radio engineering and communications*, 2022, 18(2), pp. 72-76.
13. Basit A., Wang W.Q., Nusenu S.Y. Adaptive transmit beamspace design for cognitive FDA radar tracking. *Radar Sonar Navig.*, 2019, 13(12), pp. 2083-2092.
14. Bo-Yu R., Xian-Qiang L., Yuan-Cheng Q., Hao D., Liang-Chang F., Rui H. Novel numerical analysis of electric fields in the near field of very-low-frequency antennas based on the charge simulation method. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2024, 18(8), pp. 618-628.

MİKRODALĞA DİAPAZONUNDA İŞLƏYƏN FAZLAŞDIRILMIŞ ANTENA QƏFƏSİNİN MODELLƏŞDİRİLMƏSİ

M.A.Abdullayev

Xülasə. Həlqəvi antena qəfəsinin modelləri hazırlanmış və bu antena qəfəsinin əsas xarakteristikalarının təhlili aparılmışdır. Alınmış nəticələr onu deməyə əsas verir ki, çəki, ölçü və elektrik xüsusiyyətləri nəzərə alınmaqla azimutal şüalanma sxemlərinin diskret skanlanması ilə mikrodalğalı halqa antena qəfəsinin nəzərdən keçirilən variantları radiorabitə, radiolokasiya və radionəzarət sistemlərinin avadanlıqlarında istifadə üçün perspektivli görünür. Həm də hazırlanmış həlqəvi antena qəfəsinin istiqamətlənmə diaqramlarının təhriflərinin aradan qaldırılması üçün üsul təklif edilmişdir. Bu texnikanı həyata keçirmək üçün istiqamətlənmə diaqramında təhrifləri kompensasiya etmək üçün elektromaqnit sahəsinin gücünün amplitud paylanması elektromaqnit sahəsinin gücünün faza paylanmasıdan dəyişdirilməsi alqoritmi hazırlanmışdır.

Açar sözlər: antena qəfəsi, mikrodalğa diapazonu, istiqamətlənmə diaqramı, güclənmə əmsali, modelləşdirmə.

Accepted: 19.12.2025

PUA-larda KRIPTOQRAFİK PROTOKOLLAR SAHƏSİNDƏ MÖVCUD YANAŞMALARIN ANALİZİ

İlahə Həsən qızı Qəhrəmanova

Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan

ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES IN THE FIELD OF CRYPTOGRAPHIC PROTOCOLS IN UAVs

Ilaha Hasan Gahramanova

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan: ilaha.qahramanova@aztu.edu.az

<https://orcid.org/0009-0007-9761-1922>

Abstract. The rapidly increasing use of unmanned aerial vehicles has made the cybersecurity of their communication and control systems a critical issue. Since UAVs are widely used in military, industrial, logistics, and civilian fields, ensuring their secure communication channels is of strategic importance. There is a need to develop energy-efficient and computationally lightweight authentication protocols, as well as reliable cryptographic key exchange protocols, which are the basis of secure communication. Therefore, the scientific study of functional architecture and data exchange models plays a key role in ensuring the reliability, scalability, and cybersecurity of the system. This review article analyzes the role of existing authentication and encryption protocols, as well as lightweight cryptography, PUF-based authentication, and blockchain technologies in UAV security. Future research directions - post-quantum cryptography and security mechanisms integrated with artificial intelligence - are also discussed.

Keywords: UAV, Elliptic Curve Cryptography, lightweight cryptographic protocols, post-quantum cryptography, blockchain technologies.

© 2025 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Giriş. PUA -ların Ümumi Təhlükəsizlik Problemləri

Pilotsuz uçuş aparatları (PUA) və ya dronlar, əşyaların interneti (İoT) ekosisteminin ağıllı maşınları kimi çoxsaylı sahələrdə geniş tətbiq tapmışdır. Onlar ağıllı nəqliyyat sistemlərindən tutmuş, hərbi tətbiqlərə, təcili xilasetmədən ətraf mühitin monitorinqinə qədər çoxsaylı real vaxt xidmətləri göstərir [1]. Bu cihazların aşağı qiyməti və çevik əməliyyat qabiliyyəti onların populyarlığının əsas səbəbidir [8]. Lakin, məlumatların ictimai rabitə kanalları vasitəsilə mübadiləsi [10, 11, 12] və PUA -ların tez-tez təhlükəli və ya nəzarətsiz bölgələrdə yerləşdirilməsi [3, 18] onları bir sıra təhlükəsizlik hücumlarına qarşı müdafiəsiz edir (Cədvəl).

Təhlükəsizlik problemləri əsasən növbəti kateqoriyalara ayrılır: 1) **Şəbəkə əsaslı hücumlar:** PUA, PUA-lar arasında və ya PUA ilə yer stansiyası arasında ötürülən mesajlar təqlid, sessiya açarının açılınması, mesajın təkrarlanması, ortada adam (MitM) hücumları, izləmə və dinləmə hücumlarına məruz qalır [4, 13, 14]. 2) **Fiziki ələ keçirmə hücumları:** PUA-nın fiziki olaraq ələ keçirilməsi halında, onun yaddaşında saxlanılan məxfi təhlükəsizlik parametrləri oğurlana bilər. Bu da bütün sistem üçün məxfilik və təhlükəsizlik pozuntularına səbəb olur [3, 15, 16].

PUA sistemlərində təhlükəsizlik tələbləri

PUA sistemi real vaxtlı koordinasiya tələb edən çoxqatlı arxitektura üzərində qurulmuşdur. Bu sistemlərdə əsas təhlükəsizlik tələbləri aşağıdakılardır:

- **Autentifikasiya və identifikasiya** – PUA və yer stansiyası arasında qarşılıqlı tanınma.
- **Məxfilik və məlumatın gizliliyi** – uçuş koordinatları, sensor məlumatları, komanda paketlərinin şifrənməsi.
- **Bütövlük** – məlumatın dəyişdirilməsinin qarşısının alınması.
- **Yüngülçəki hesablama** – məhdud enerji və prosessor gücünə uyğun kriptografiya.
- **Fiziki təhlükəsizlik** – cihazın ələ keçirilməsi və reverse engineering hücumlarına davamlılıq

Bu tələblər müxtəlif protokolların əsas dizayn motivlərini formalaşdırır.

PUA təhlükəsizlik protokollarının mövcud yanaşmaları

ECC (Elliptic Curve Cryptography) PUA şəbəkələrində ən geniş istifadə olunan asimmetrik kriptografiya mexanizmidir, çünki qısa açarlar yüksək təhlükəsizlik təmin edir. [1]-də ECC və simmetrik açar əsaslı protokol təqdim olunur. ECC-nin seçimi, Rivest-Shamir-Adleman (RSA) alqoritmi kimi digər asimmetrik şifrələmə alqoritmləri ilə müqayisədə nisbətən daha qısa açar ölçüləri ilə müəyyən edilmişdir. [5]-də uğurlu identifikasiyadan sonra hər iki tərəf təhlükəsiz rabitə üçün gizli sessiya açarı yaradılmasına baxılır. PUA sistemindəki bu vacib problemi həll etmək üçün TCALAS adlanan yeni bir zaman etimadnaməsinə əsaslanan anonim yüngül istifadəçi identifikasiyası mexanizmi hazırlamışdır. Daha az vaxt və resurs sərfiyyatı ilə [6]-da təhlükəsizlik problemlərinin öhdəsindən gəlmək üçün [5]-də təklif edilmiş dron şəbəkələri üçün müvəqqəti etimadnaməyə əsaslanan anonim yüngül identifikasiya sxemi (TCALAS) izlənilə bilənliyə və oğurlanmış doğrulayıcı hücumlarına qarşı zəif olduğundan, həmçinin miqyaslanma bilmədiyindən təkmilləşdirilmişdir. [6]-da yüngül simmetrik açar primitivlərindən və müvəqqəti etimadnamələrdən istifadə edərək təkmilləşdirilmiş sxem (iTALAS) təklif olunur. Təklif olunan sxem yüngüllüyü qoruyub saxlayaraq izləmə və oğurlanmış doğrulayıcı da daxil olmaqla bir çox məlum hücumlara qarşı təhlükəsizlik təmin edir. iTALAS miqyaslanmanı genişləndirir və IoD (dronların interneti) mühitində bir neçə uçuş zonası/klasteri olduqda işləyə bilər. [4]-də IoD tətbiqlərindəki bu problemləri həll etmək üçün serverin köməyi ilə istifadəçi ilə giriş əldə edilmiş PUA arasında yeni bir autentifikasiya və açar razılaşma sxemi təqdim edilir. İstifadəçi ilə PUA arasında uğurlu qarşılıqlı autentifikasiyadan sonra qurulan sessiya açarı, onlara müxtəlif məlum hücumların düşməni tərəfindən qarşısının alınması üçün təhlükəsiz şəkildə əlaqə qurmağa kömək edir. [7]-də IoD mühitində etibarlı rabitəni təmin etmək üçün səmərəli Doğrulanmış Sessiya Açarı Qurulması (ASKE) yanaşmasını tələb edir. Məqalədə IoD üçün Məxfiliyi Qoruyan ASKE sxemi (PASKE-IoD) təqdim edilir. PASKE-IoD, ASKE mərhələsini yerinə yetirmək üçün Doğrulanmış Şifrələmə ibtidai "ASCON" və heş funksiyasından "ASCON-heş" istifadə edir.

[8]-də məlumatların mobil cihaz vasitəsilə toplanma biləcəyi müəyyən nöqtələrə quraşdırılmış sensorları olan nəzarətsiz bir mühit nəzərdən keçirilir. Bu cihaz əslində PUA-dır. Əvvəlcə bunun üçün uyğun bir arxitektura, həmçinin yerini dəyişə bilən dron vasitəsilə cihazlar və bulud arasında təhlükəsiz rabitə qurmaq üçün yüngül bir protokol hazırlanmışdır. Protokol həmçinin mesajı rabitədə şifrələmək üçün istifadə edilən Fiziki Klonlanmayan Funksiyanın (PUF) üstünlüklərindən istifadə edir.

[9]-da İKT və İnternetin artan populyarlığı, PUA Nəqliyyat Vasitələrinin Ad-hoc Şəbəkəsinə (VANET) əlverişli kömək təklif etməsinə və yoldakı əlaqəsiz seqmentlər arasında ötürmə qovşağının rolunu həyata keçirməsinə imkan yaratmışdır. Bu ssenaridə, rabitə nəqliyyat vasitələri arasında PUA-larla (V2U) həyata keçirilir və sonradan PUA ilə dəstəklənən VANET-ə çevrilir. PUA ilə dəstəklənən VANET istifadəçilərə real vaxt məlumatlarına, xüsusən də mövcud mobil şəbəkələrdən istifadə edən ağıllı şəhərlərdə monitoring məlumatlarına daxil olmağa imkan verir. Buna baxmayaraq, rabitə infrastrukturunun açıq təbiətinə görə, nəqliyyat vasitələrinin yüksək hərəkətliliyi, təhlükəsizlik və məxfilik məhdudiyyətləri PUA ilə dəstəklənən VANET-in əsas narahatlıqlarıdır. Bu ssenarilərdə Dərin Öyrənmə Alqoritmləri (DLA) PUA ilə dəstəklənən VANET-in təhlükəsizliyi, məxfiliyi və marşrutlaşdırma məsələlərində təsirli rol oynaya bilər. Bunu nəzərə alaraq, PUA ilə dəstəklənən VANET üçün DLA əsaslı açar mübadiləsi protokolu hazırlamışlar.

[10]-da müstəqil olaraq həssas məlumat toplayan PUA mühiti üçün S-IoD çərçivəsi təqdim olunur. Doğrulama protokolunun hesablama xərclərini azaltmaq üçün yüngül məxfiliyi qoruyan sxem (L-PPS) təqdim olunur. Təklif olunan L-PPS, etibarlı identifikasiya müddəti ilə IoT cihazları arasında möhkəmlik təmin etmək üçün konstruktivdir.

[11]-də PMAP adlı yüngül və məxfiliyi qoruyan qarşılıqlı identifikasiya və açar razılaşma protokolu təklif edilir. Sonuncu, qarşılıqlı identifikasiyanı dəstəkləmək və IoD sistemindəki rabitə qurumları arasında təhlükəsiz sessiya açarı yaratmaq üçün fiziki klonlanmayan funksiyadan və xaos sistemindən istifadə edir. PMAP iki sxemdən ibarətdir: 1) PMAPD2Z (dron və zona xidmət təminatçısını qarşılıqlı olaraq təsdiqləyən və təhlükəsiz sessiya açarlarını yaradan) və 2) PMAPD2D (dronları qarşılıqlı olaraq təsdiqləyən və təhlükəsiz sessiya açarlarını yaradan).

[12]-də xüsusən də hərbi şəraitdə PUA rabitə protokolunun təhlükəsizlik şərtləri araşdırılmışdır. Daha da əhəmiyyətli, PUA-lar arasında və PUA ilə Yerüstü İdarəetmə Stansiyası (YİS) arasında rabitənin təhlükəsizliyini təmin edən təhlükəsizlik protokolu (iki alt protokolla) təklif olunur. Bu protokol, ümumi təhlükəsizlik tələblərindən əlavə, təhlükəsiz hərbi rabitə üçün vacib olan mükəmməl irəli məxfilik və rədd edilməmə prinsiplərinə nail olur.

[13]-də təklif olunan protokol, kriptografik XOR, təhlükəsiz rabitə üçün heş funksiyası və unikal cihazdan asılı identifikasiya generasiyası üçün fiziki olaraq klonlanmayan funksiyadan (PUF) və fiziki hücumların qarşısını almaq üçün yüngül təhlükəsizlik həllindən istifadə edir. Bu müstəqil protokol əlavə rabitə və hesablama resursları tələb etmədən cihazdan cihaza və cihazdan serverə identifikasiyanı həyata keçirə bilər və bu da fərqli protokollara olan ehtiyacı aradan qaldırır.

[14]-də blokçeyn texnologiyasının tətbiqi və yüngül kriptografik alqoritmlərin kombinasiyasının IoT şəbəkələrində təhlükəsizliyi artırmaq üçün istifadə edilə biləcəyini müəyyən etməyi hədəfləyir. IoT cihazı məhdud emal və enerji tutumuna malik olduğundan təhlükəsiz məlumatların ötürülməsində problem yaşamayacaq. Mövcud ədəbiyyat vasitəsilə məxfilik və identifikasiyanı təmin etmək üçün IoT tətbiqləri üçün uyğun simmetrik şifrələmə və heş funksiyaları da daxil olmaqla bir neçə yüngül şifrələmə üsulu müzakirə olunur. Bundan əlavə, məqalədə blokçeyndə ağıllı müqavilələrin tətbiqinin təhdidlərə vaxtında reaksiya verən və kiberhücumların qarşısını alan avtomatlaşdırma üçün təhlükəsizlik siyasətlərinin təmin edilməsinə necə imkan verdiyi nəzərdən keçirilir. Bu texnologiyalar birlikdə problemlərə qarşı güclü müdafiə mexanizmi təmin edir ki, bu da IoT-nu daha qorunmuş və istifadə üçün təhlükəsiz edir. Təklif olunan həllin miqyaslılığı, səmərəliliyi və mümkünlüyü də bu məqalədə təqdim edilmişdir və beləliklə, təqdim olunan həllin effektivliyi potensial real dünya IoT sistemləri kimi xidmət etmək üçün araşdırılmışdır.

[15]-də IoT arxitekturasının hər bir məntiqi təbəqəsi üçün mümkün bir həll təklif edilir. Bundan əlavə, şifrələmə mexanizmini, məxfiliyin mərkəzləşdirilməməsini, təhlükəsiz rabitəni, yüngül kriptografik protokolu və bütün təhlükəsizlik təhdidlərinə qarşı həll yollarının nümayişi hazırlanmışdır.

Məqalələrdə istifadə edilən tədqiqat mövzuları və texnologiyalar

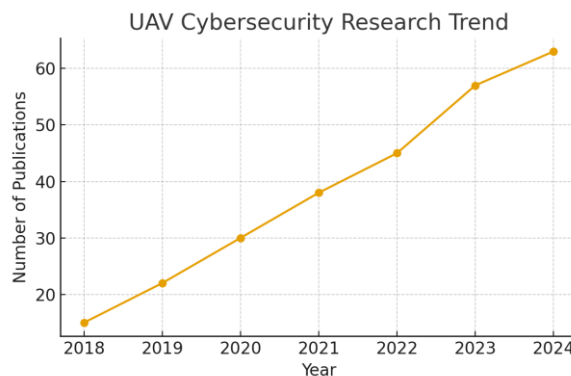
Mövzu / Texnologiya	Təsvir	Əlaqədar İstinadlar
Autentifikasiya və Ümumi Təhlükəsizlik	PUA-lar, yerüstü idarəetmə stansiyaları və digər IoT qurğuları arasında rabitənin geniş yayılmış kibertəhlükələrə qarşı qorunması.	[1-16]
Post-Kvant Kriptografiya (PQC)	Həm klassik, həm də kvant kompüter hücumlarına qarşı davamlı olması üçün nəzərdə tutulmuş kriptografik alqoritmlər.	[2, 4, 9]
Blokçeyn Texnologiyası	PUA şəbəkələrində təhlükəsizliyin və məlumat bütövlüyünün artırılması məqsədilə mərkəzləşdirilməmiş və saxtalaşdırılması çətin reyestrlərdən istifadə.	[3, 7, 10]
Aparat Səviyyəli Təhlükəsizlik (PUF-lar)	Yüngül və klonlanması çətin autentifikasiya mexanizmləri üçün fiziki klonlanmayan funksiyalardan istifadə.	[10]
Hibrid və Kvant Autentifikasiyası	Gələcəkdə davamlı təhlükəsizliyin təmin edilməsi üçün kvant davamlı mexanizmlərin (məsələn, QKD) klassik sistemlərlə inteqrasiyası.	[10]

[16]-da Kvant hesablamasının ortaya çıxması IoT-nə əsaslanan istehlakçı elektronika cihazlarında köhnə kriptografik protokolların təhlükəsizliyini ciddi şəkildə təhdid edir. Bunlar sənaye idarəetmə sistemləri, ağıllı şəbəkələr və səhiyyə kimi vacib infrastrukturların əsas komponentləridir. Xüsusilə, bu iş dərin öyrənmə metodlarını post-kvant kriptografiyası (PQC) ilə birləşdirməklə IoT-nin klassik və kvant əsaslı kiberhücumlara qarşı müqavimətini necə gücləndirməyi araşdırır. IoT istehlakçı cihazlarında açar mübadiləsi, şifrələmə və identifikasiya proseslərini qorumaq üçün biz qəfəs əsaslı, heş əsaslı və kod əsaslı kriptografiya da daxil olmaqla kvanta davamlı kriptografik alqoritmlərdən istifadə etməyə davam ediləcəkdir. Real vaxt rejimində anomaliya aşkarlanması və cavablandırma imkanlarını təmin etmək üçün PQC-ni dərin öyrənməyə əsaslanan müdaxilə aşkarlama sistemləri ilə birləşdirən hibrid təhlükəsizlik çərçivəsi təklif edilir. Metodologiya gələcəkdə IoT

sistemləri daxilində kvant hücumları ilə əlaqəli təhlükəsiz rabitə və məlumat mübadiləsini təmin edir və Müdaxilə Aşkarlama Sistemi (IDS) modellərinin yeni hücum vektorlarına uyğunlaşmasına imkan vermək üçün zamanla davamlı öyrənmədən istifadə edir. PQC tətbiqinin çətin olacağı resursla məhdud olan IoT vəziyyətlərini nəzərə alaraq, kənar hesablama qovşaqlarında və Əşyaların İnterneti cihazlarında yerləşdirmək üçün yüngül və uyğun olan PQC həlləri üçün optimallaşdırılmış alqoritmlər təklif edilir.

Tədqiqat yeniliklərinin analizi

Son illərdə PUA sənaye, hökumət və akademiya tərəfindən əhəmiyyətli dərəcədə diqqət və populyarlıq qazanmışdır. Sürətli inkişafı və mülki hava məkanına yerləşdirilməsi ilə PUA-lar mal-ların çatdırılması, axtarış-xilasetmə və nəqliyyatın monitorinqi daxil olmaqla müxtəlif tətbiqlərdə mühüm rol oynayır. Uğurlu və etibarlı uçuş missiyası üçün PUA-ların identifikasiya modelləri vasi-təsilə təhlükəsiz rabitə təmin etmək vacibdir. Bu cür tələbləri ödəmək üçün ədəbiyyatlarda çoxsaylı identifikasiya mexanizmləri təklif edilmişdir. On altı fərqli məqalədən istifadə edərək PUA iden-tifikasiyası işinin təhlükəsizliyi təhlil edilir. Təhlil göstərir ki, PUA identifikasiyası sxemlərinin əksəriyyəti rabitə xərcləri baxımından yüngüldür. Lakin, saxlama xərci və ya enerji istehlakı bir çox identifikasiya tədqiqatları tərəfindən bildirilmir. Daha sonra, təhlükəsizlik təhlilində geniş istifadə olunan formal modelləri (yəni, riyazi model vasitəsilə identifikasiya protokolunun mücərrəd təsvir-ləri) aşkar edilir, halbuki tədqiqatların əksəriyyətində PUA sistemlərini hədəf ala biləcək bir çox hücumlar əhatə olunmur. Həmçinin, təhlükəsiz və etibarlı PUA identifikasiya sxemlərinin hazırlan-ması və tətbiqi üçün həll edilməli olan çətinliklər vurğulanır. Nəhayət, gələcək tədqiqatlar üçün perspektivli istiqamətləri motivasiya etmək üçün PUA-ların identifikasiya strategiyaları üzrə əldə edilən dərslər ümumiləşdirilir.



2018-2024-cü illərdə PUA-ların kibertəhlükəsizliyi ilə əlaqəli nəşrlər

Şəkildən göründüyü kimi, son yeddi ildə PUA-ların kibertəhlükəsizliyinin tədqiqatına diqqət nəzərəcarpacaq dərəcədə yüksəlmişdir. 2018 və 2019 illər arasında artım on faiz təşkil etsə də, yeddi il ərzində inkişaf altmış faizə qədər yüksəlmişdir. Artım inkişafda olan sahəyə gələcəkdə daha çox tədqiqatçıların diqqətini yönəldəcəyini və mövcud boşluqların aradan qaldırılmasına ehtiyac olduğunu göstərir.

PUA sistemlərinin təhlükə modeli

PUA kommunikasiya kanalları bir neçə hücumla məruz qala bilər:

- **Replay attack** – köhnə kadrılardan istifadə edərək sistemin aldadılması
- **MITM (Man-in-the-Middle)** – PUA sisteminə aid olan elementlər arasında rabitə kanallarına qoşularaq məlumatın dəyişdirilməsi
- **GPS spoofing / jamming** – naviqasiyanın pozulması
- **Key extraction attacks** – kriptografik açarlarının oğurlanması

- **Firmware injection** – zərərli proqram təminatının yüklənməsi PUA -lar üçün təhlükə modelinin fərqi odur ki:
- **Komprometasiya real fiziki insidentlərə gətirə bilər.**
- **Resurs məhdudluğu** (CPU, enerji) klassik kriptoproqramların tətbiqini çətinləşdirir.
- **Hərəkətli node-lar** geriye-qaytarılan gecikməyə həssasdır.

Kriptografik müdafiə mexanizmləri

Tədqiqatçılar, qeyd olunan təhlükəsizlik problemlərini həll etmək və resursları məhdud olan dronlar üçün uyğun həllər təklif etmək məqsədilə müxtəlif yüngül təhlükəsizlik protokolları hazırlamışlar. Bu protokollar əsasən aşağıdakı texnologiyalara əsaslanır:

Simmetrik və Elliptik Əyrilər Əsaslı Şifrələmə

PUA rabitəsində ən çox tətbiq olunan üsullardan biri simmetrik açar və Elliptic Curve Cryptography (ECC) birləşməsidir. [1]-də təklif edilən protokol, simmetrik açarın ECC vasitəsilə təhlükəsiz mübadiləsinin təmin etməklə hesablama yükünü azaldır və yüksək sürətli məlumat ötürməsinə qoruyur. Bu yanaşma həm də uçuş zamanı real vaxt rejimində şifrələnmiş məlumat ötürülməsi üçün uyğundur [1, 10].

Yüngül Autentifikasiya və Açar Mübadiləsi Protokolları

[4]-də IoD mühitində uzaqdan istifadəçi autentifikasiyası və açar razılaşması üçün yüngül sxem təklif etmişdir. Bu protokol hesablama xərclərini minimuma endirir və qarşılıqlı autentifikasiyanı təmin edir. Eyni istiqamətdə müvəqqəti etimadnamələrə əsaslanan anonim autentifikasiya (TCALAS) sistemi ilə şəxsiyyətin məxfiliyini qorumağa nail olmuşlar [5]. [7]-də PASKE-IoD adlı protokolu isə həm məxfilik, həm də autentifikasiyanı birləşdirərək məlumat mübadiləsinin daha etibarlıdır.

PUF Əsaslı Təhlükəsizlik

PUF texnologiyası son illərdə PUA təhlükəsizliyində effektiv yanaşma kimi formalaşır. PUF, yarımkeçirici cihazların fiziki xüsusiyyətlərindən istifadə edərək hər bir cihaz üçün unikal və klonlanması çətin olan "rəqəmsal barmaq izi" yaradır. [8]-də CoMSeC++ protokolunda PUF-lərdən istifadə etməklə unikal cihaz identifikasiyasını təmin etmiş və hücumu davamlı autentifikasiya sistemi təqdim etmişlər. Eyni prinsiplər PLAKE protokolunda da tətbiq olunaraq [13], açar mübadiləsinin saxtalaşdırılmasının qarşısını almışdır. [8, 10, 13]-də təklif olunan protokollar PUF-dan istifadə edərək, hətta fiziki ələ keçirmə halında belə, məxfi açarların sızdırılmasının qarşısını alır və möhkəm müdafiə təmin edir.

Blokçeyn və Paylanmış Etibar Mexanizmləri

Blokçeyn əsaslı yanaşmalar, xüsusilə təhlükəsiz məlumat ötürülməsi və şəffaf autentifikasiya üçün perspektivli sayılır. [15] göstərir ki, yüngül blokçeyn modelləri ilə kriptografik əməliyyatlar arasında tarazlıq saxlanıla bilər. Bu yanaşma dronların idarəetməsində mərkəzləşmiş etibar sistemlərinin tətbiqinə imkan yaradır. [14, 15]-də qeyd olunduğu kimi, blokçeyn dron şəbəkələrində məlumatın bütövlüyünü qorumaq, təhlükəsiz açarların mübadiləsinin asanlaşdırmaq və qərarların izlənilməsi üçün istifadə edilir.

Süni İntellekt və Dərin Öyrənmə Əsaslı Təhlükəsizlik

Yeni tədqiqatlarda dərin öyrənmə modelləri ilə post-kvant kriptografiyasının birləşməsi dronların gələcək müdafiə sistemləri üçün ümidverici istiqamət sayılır [16]. Bu yanaşma real vaxtda hücum aşkarlanması və adaptiv cavab mexanizmlərinin inkişafına şərait yaradır.

Tədqiqat boşluqları və inkişaf istiqamətləri

Mövcud məsələlər müəyyən təhlükəsizlik problemlərini həll etsə də, texnologiyanın inkişafı ilə yeni təhdidlər ortaya çıxır. Bunlardan ən kritiki, kvant hesablamanın təhlükəsizlik üçün təhdididir. Güclü kvant kompüterləri hazırda IoD şəbəkələrinin təhlükəsizliyinin əsasını təşkil edən bir çox ənənəvi kriptografik alqoritmi, o cümlədən ECC sındıra bilər. Bu, bütün müdafiə olunan məlumatların məxfiliyinin və bütövlüyünün təhlükə altına qoyulması potensialına malikdir.

Kvant-Sonrası Kriptografiya (PQC): Kvant hücumlarına qarşı davamlı olan kriptografik alqoritmlər üzərində işlər davam edir. [16]-da qeyd olunduğu kimi, PQC-nin İoT cihazları ilə integrasiyası, o cümlədən PUA -lar, onların təhlükəsizliyini gələcək təhdidlər qarşısında qorumaq üçün vacib bir addımdır. Bu, Dronların Kvant İnterneti (İoQD) kimi yeni anlayışların yaranmasına səbəb olur.

İoQD və Hibrid Autentifikasiya Modelləri: İoQD, kvant rabitəsi (məsələn, kvant açarı paylanması - QKD) kimi kvant texnologiyaları ilə təchiz edilmiş PUA şəbəkələrini ifadə edir. Əsas çətinlik, klassik PUA-larla kvant PUA-larının birgə işləyə biləcəyi hibrid autentifikasiya modellərinin yaradılmasıdır. Bu, iki fərqli texnologiyayı birləşdirən və təhlükəsiz şəkildə qarşılıqlı əlaqəni təmin edən yeni protokolların işlənilib hazırlanmasını tələb edir.

Enerji optimizasiyası baxımından PUA-ların çoxunun batareya ehtiyatı məhduddur. Bu səbəblə kriptografik əməliyyatların enerji optimizasiyası hələ də açıq qalan problemdir. 6G və massiv İoT ilə integrasiya gələcək PUA-lar 6G şəbəkələri ilə birlikdə işləyəcək və aşağı gecikməli çoxsaylı bağlantılar tələb edəcək. Həmçinin, süni intellekt əsaslı hücumlardan müdafiə PUA-ların kiberfiziki təbiəti onların Maşın Öyrənməsi-əsaslı hücumlardan qorunmasını tələb edir

Nəticə

PUA-lar üçün təhlükəsizlik protokolları sürətlə inkişaf edən tədqiqat sahəsidir. İoD geniş imkanlar təqdim etsə də, ictimai rabitə kanalları və fiziki hücumlar kimi mürəkkəb təhlükəsizlik problemləri ilə üzləşir. Hazırkı yanaşmalar müəyyən səviyyədə təhlükəsizlik təmin etsə də, formal doğrulama, enerji optimizasiyası və post-kvant kriptografiyanın tətbiqi hələ də araşdırma tələb edir. Bu icmal müasir protokolları sistemli şəkildə müqayisə edir və gələcək tədqiqat istiqamətlərini müəyyən edir. Tədqiqatçılar, ECC, PUF və blokcheyn kimi yüngül kriptografiya və autentifikasiya protokolları ilə bu problemlərə qismən həll tapmışlar. Lakin, kvant hesablamaların yüksəlişi, mövcud kriptografik sistemlər üçün yeni təhdid yaradır. Buna görə də, gələcək tədqiqatlar PQC tətbiqinə, klassik və kvant dron şəbəkələri arasında təhlükəsiz əlaqəni təmin edəcək hibrid autentifikasiya modellərinin işlənilib hazırlanmasına yönəldilməlidir. Bu yanaşma, İoD sistemlərinin uzunmüddətli təhlükəsizliyini və davamlılığını təmin edəcəkdir.

ƏDƏBİYYAT

1. Nyangaresi V.O., Jasim H.M., Mutlaq K.A.-A., Abduljabbar Z.A., Ma J., Abduljaleel I.Q., Honi D. G. A Symmetric Key and Elliptic Curve Cryptography-Based Protocol for Message Encryption in Unmanned Aerial Vehicles. *Electronics*, 2023, 12(17), 3688.
2. Yahuza M., Idris M.Y.I., Wahab A.W.A., Nandy T., Ahmedy I.B., Ramli R. An Edge Assisted Secure Lightweight Authentication Technique for Safe Communication on the Internet of Drones Network. In *IEEE Access*, vol. 9, pp. 31420-31440, 2021.
3. Tian C., Ma J., Li T., Zhang J., Ma C., Xi N. Provably and Physically Secure UAV-Assisted Authentication Protocol for IoT Devices in Unattended Settings. In *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 19, pp. 4448-4463, 2024.
4. Wazid M., Das A.K., Kumar N., Vasilakos A.V., Rodrigues J.J.P.C. Design and Analysis of Secure Lightweight Remote User Authentication and Key Agreement Scheme in Internet of Drones Deployment. In *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 3572-3584, April 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2888821.
5. Srinivas J., Das A.K., Kumar N., Rodrigues J.J.P.C. TCALAS: Temporal Credential-Based Anonymous Lightweight Authentication Scheme for Internet of Drones Environment. In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 7, pp. 6903-6916, July 2019.
6. Ali Z., Chaudhry S.A., Ramzan M.S., Al-Turjman F. Securing Smart City Surveillance: A Lightweight Authentication Mechanism for Unmanned Vehicles. In *IEEE Access*, vol. 8, pp. 43711-43724, 2020.
7. Tanveer M., Khan A.U., Shah H., Chaudhry S.A., Naushad A. PASKE-IoD: Privacy-Protecting Authenticated Key Establishment for Internet of Drones. In *IEEE Access*, vol. 9, pp. 145683-145698, 2021.
8. Mall, Priyanka, et al. "CoMSeC++: PUF-based secured light-weight mutual authentication protocol for Drone-enabled WSN." *Computer Networks* 199 (2021).
9. Akram M.W. et al. A Secure and Lightweight Drones-Access Protocol for Smart City Surveillance. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 10, pp. 19634-19643, Oct. 2022.
10. Deebak, Bakkiyam David, Fadi Al-Turjman. A smart lightweight privacy preservation scheme for IoT-based UAV communication systems. *Computer Communications* 162 (2020): 102-117.

11. Pu C., Wall A., Choo K.-K.R., I.Ahmed, Lim S. A Lightweight and Privacy-Preserving Mutual Authentication and Key Agreement Protocol for Internet of Drones Environment. In IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 12, pp. 9918-9933, 15 June 15, 2022.
12. Ko, Yongho et al. Drone secure communication protocol for future sensitive applications in military zone. *Sensors* 21.6 (2021): 2057.
13. Roy S., Das D., Mondal A., Mahalat M.H., Sen B., Sikdar B. PLAKE: PUF-Based Secure Lightweight Authentication and Key Exchange Protocol for IoT. In IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 10, pp. 8547-8559, 15 May 15, 2023.
14. Naveen V., Narang S., Ramesh P.S., Ponmalar A., Sudha I. Secure Data Transmission in IoT Networks Using Blockchain and Lightweight Cryptography: Safeguarding the Connected Future. 2025 3rd International Conference on Communication, Security, and Artificial Intelligence (ICCSAI), Greater Noida, India, 2025.
15. Chowdhury N.J.K., Alam K.M.R., Islam M.M. Security and Privacy in IoT using Blockchain and Lightweight Cryptographic Protocol. 2022 IEEE 7th International conference for Convergence in Technology (I2CT), Mumbai, India, 2022.
16. Sharma A., Rani S. Post-Quantum Cryptography (PQC) for IoT-Consumer Electronics Devices Integrated With Deep Learning. In IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 71, no. 2, pp. 4925-4933, May 2025.

PUA-larda KRİPTOQRAFİK PROTOKOLLAR SAHƏSİNDƏ MÖVCUD YANAŞMALARIN ANALİZİ

İ.H.Qəhrəmanova

Xülasə. Pilotsuz uçuş aparatlarının sürətlə artan istifadəsi onların rabitə və idarəetmə sistemlərinin kibertəhlükəsizliyini kritik məsələyə çevirmişdir. PUA-lar hərbi, sənaye, logistika, və mülki sahələrdə geniş tətbiq olunduğuna görə, onların təhlükəsiz rabitə kanallarının təmin edilməsi strateji əhəmiyyət daşıyır. Enerji-effektiv və hesablama baxımından yüngül autentifikasiya protokolu, həmçinin təhlükəsiz rabitənin təməli olan etibarlı kriptografik açar mübadiləsi protokollarının işlənilib hazırlanmasına tələbat vardır. Buna görə də funksional arxitektura və məlumat mübadiləsi modellərinin elmi əsaslarla öyrənilməsi sistemin etibarlılığı, miqyaslı bilməsi və kibertəhlükəsizliyinin təminatında əsas rol oynayır. Bu icmal məqalədə mövcud autentifikasiya və şifrələmə protokolları, eləcə də yüngül kriptografiya, PUF əsaslı autentifikasiya və blokçeyn texnologiyalarının PUA təhlükəsizliyində rolu təhlil olunur. Həmçinin gələcək tədqiqat istiqamətləri – post-kvant kriptografiyası və süni intellektlə inteqrasiya olunmuş təhlükəsizlik mexanizmləri müzakirə edilir.

Açar sözlər: PUA, Elliptic Curve Cryptography, yüngül kriptografik protokollar, post-kvant kriptografiyası, blokçeyn texnologiyaları.

Accepted: 18.12.2025

MÜƏLLİFLƏR ÜÇÜN TƏLİMAT

Məqalə hazırlanarkən aşağıdakı tələblər nəzərə alınmalıdır:

1. Məqalə azərbaycan, rus və ingilis dillərindən birində, Microsoft Word mətn redaktorunda A4 formatında (soldan, yuxarıdan, aşağıdan və sağdan – 2 sm), Times New Roman şrifti ilə 12 ölçüdə, vahid sətirarası intervalla və mətn daxili yazıda 1 sm abzas buraxmaqla hazırlanmalı, səhifə sayı 5-8 arasında olmalıdır.

2. Məqalənin mətninin aşağıdakı bölmələrdən ibarət olması tövsiyə olunur:

- giriş (məsələnin aktuallığı, problemin hazırkı vəziyyəti);
- tədqiqatın məqsədi, məsələnin qoyuluşu;
- məsələnin həll üsulları və aprobeasiyası;
- alınan nəticələrin tətbiqi;
- nəticə.

3. Məqalə aşağıdakı ardıcılıqla hazırlanmalıdır: məqalənin adı – ortadan, böyük hərflərlə, qalın şriftlə, sonda bir boş sətir; müəlliflərin adı, soyadı və atasının adı açıq şəkildə yazılmalıdır – ortadan, qalın şriftlə; müəlliflərin iş yeri, şəhər, ölkə və e-poçt ünvanı – ortadan kursivlə; müəlliflərin ORCID nömrələri – ortadan kursivlə, sonda bir boş sətir; xülasə (min. 100 söz, maks. 200 söz); açar sözlər (3-5 söz) – kursivlə; giriş və digər alt başlıqlar – soldan, qalın şriftlə, əvvəlində bir boş sətir.

Məqalənin adı, müəlliflərin adı, soyadı və atasının adı, xülasə və açar sözlər məqalənin yazıldığı dildə və ingilis dilində təqdim olunmalıdır. Əgər məqalə ingilis dilində tərtib edilibsə, yuxarıda qeyd olunanlar yalnız ingilis dilində yazılmalıdır.

4. Ədəbiyyat siyahısı: hər bir istinad olunan mənbənin adı tərcümə olunmadan, məqalədə istifadə olunma ardıcılığına uyğun olaraq nömrələnir. Mətnə istinadlar aşağıdakı kimi verilir:

– əgər istinad edilən əsər jurnal materialıdırsa mətnin daxilində kvadrat mötərizədə göstərilir (məsələn, [3]). Ədəbiyyat siyahısında isə əsər müəlliflərinin soyadı, inisialı, əsərin adı, jurnalın adı, buraxıldığı il, seriya və ya nömrəsi, əsərin jurnaldakı səhifə aralığı göstərilir.

Məsələn, 3. Əmənov Y.A. Abrazivin metalla toxunma zonasında yaranan gərginliklərin təyini metodikası haqqında. AZTU-nun elmi əsərləri, 2021, №1, s. 65-71.

– əgər istinad edilən əsər kitab materialıdırsa mətnin daxilində kvadrat mötərizədə istinadın nömrəsi və əsərin kitabdakı səhifə aralığı göstərilir (məsələn, [9, s. 120-122]). Ədəbiyyat siyahısında isə əsər müəlliflərinin soyadı, inisialı, əsərin adı, şəhər adı, nəşriyyat adı, buraxıldığı il, kitabın ümumi səhifə sayı göstərilir.

Məsələn, 9. Cümşüdoğ S.Q. İdarəetmə qərarlarının qəbulu. Bakı, "Təhsil NPM", 2010, 160 s.

5. Məqalədə cədvəl və şəkillər nömrələnir: cədvəl – cədvəlin yuxarısında, kursivlə, sağdan (məs., *Cədvəl 1*), şəkil – şəkilin altında, kursivlə, ortadan (məs., *Şəkil 1.*) və mətn hissədən (yuxarıdan və aşağıdan) bir boş sətir buraxmaqla göstərməlidir. Cədvəllər bilavasitə məqalənin mətnində yerləşdirilməlidir. Hər cədvəlin öz başlığı olmalıdır. Cədvəllərdə mütləq ölçü vahidləri göstərməlidir. Şəkillər aydın və vahid obyekt şəklində olmalıdır (ayrı-ayrı şəkillərin süni qruplaşdırılaraq yerləşdirilməsi yolverilməzdir).

6. Məqalədə istifadə olunan ölçü vahidləri beynəlxalq ölçü vahidləri sisteminə uyğun olmalıdır. Qəbul olunmuş sözlərdən başqa (və s., və i.a.), qısaldılmış sözlərdən istifadə etmək olmaz.

7. Düsturlar Microsoft Equation-də standart parametrlərlə yığılır. Mətnə ancaq istifadə olunan düsturlar nömrələnir. Düsturun nömrəsi sağda mötərizədə yazılır.

8. Redaksiyaya məqalə göndərildikdə müəlliflər haqqında məlumat: soyadı, adı, atasının adı, elmi dərəcəsi, elmi rütbəsi, iş yeri, vəzifəsi, ORCID nömrəsi, məqalənin aid olduğu bölmə, telefon nömrəsi, e-poçt ünvanı da təqdim olunmalıdır.

9. Redaksiyaya daxil olan məqalələr rəyə təqdim olunur və müsbət rəy almış məqalələr çapa tövsiyə olunur.

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The following requirements should be considered for preparing the article:

1. The article should be prepared in Azerbaijani, Russian, or English, using the Microsoft Word text editor, in A4 format with margins of 2 cm on the left, top, bottom, and right. The font should be Times New Roman, size 12, with single line spacing, and a 1 cm paragraph indentation. The text should be between 5-8 pages.

2. It is recommended that the text of the article consist of the following sections:

- Introduction (relevance of the issue, current state of the problem);
- Research purpose, problem statement;
- Methods of problem resolution and validation;
- Application of obtained results;
- Conclusion.

3. The article should be prepared in the following sequence: the title of the article – centered, in uppercase, bold, with an extra line at the end; authors' names, surnames, and patronymics should be clearly written – centered, in bold; the authors' workplace, city, country, and email address – centered in italics; authors' ORCID numbers – centered in italics, with an extra line at the end; abstract (min. 100 words, max. 200 words); keywords (3-5 words) – in italics; introduction and other subheadings – left-aligned, in bold, with an extra line at the beginning.

The title of the article, authors' names, surnames, and patronymics, abstract, and keywords should be presented in the language in which the article is written and in English. If the article is written in English, the above-mentioned information should be in English only.

4. Bibliography: Each cited source in the article should be numbered according to the order of use in the text, without translation of the source's name. Citations in the text are given as follows:

– If the cited work is a journal article, it is indicated within square brackets in the text (e.g., [3]). In the bibliography, the authors' surname, initials, the title of the work, the name of the journal, the year of publication, series or number, and the page range in the journal are provided. Example: 3. Amanov Y.A. Methodology for determining stresses in the contact zone of abrasive with metal. Proceedings of AzTU, 2021, No.1, pp. 65-71.

– If the cited work is a book, the reference number and the page range of the work in the book are indicated within square brackets in the text (e.g., [9, p. 120-122]). In the bibliography, the authors' surname, initials, the title of the work, city name, publishing house name, year of publication, and the total number of pages in the book are provided. Example: 9. Jumshudov S.G. Adoption of managerial decisions. Baku, "Təhsil NPM", 2010, 160 p.

5. Tables and figures in the article are numbered: the table number is indicated above the table in italics, aligned to the right (e.g., *Table 1*), the figure is indicated below the figure in italics, centered (e.g., *Figure 1*), and should be separated from the text portion (top and bottom) by an empty line. Tables should be directly placed in the text of the article. Each table should have its own title. Measurement units must be specified in tables. Figures should be clear and presented as a single object (grouping individual figures separately is not allowed).

6. Measurement units used in the article should conform to the international system of measurement units. The use of accepted abbreviations (e.g., etc., et al.) and shortened words is not allowed.

7. Formulas are constructed using Microsoft Equation with standard parameters. Only the formulas used in the text are numbered, and the formula number is written to the right in parentheses.

8. When submitting an article to the editorial office, information about the authors should be provided: surname, name, patronymic, academic degree, academic title, workplace, position, ORCID number, section to which the article belongs, phone number, and email address.

9. Articles submitted to the editorial office are subjected to review, and positively reviewed articles are recommended for publication.

УКАЗАНИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

При подготовке статьи необходимо учитывать следующие требования:

1. К публикации принимаются статьи на азербайджанском, русском и английском языках, в текстовом редакторе Microsoft Word формата А4 (слева, сверху, снизу и справа – 2 см), текст набирается шрифтом Times New Roman- размер кегля 12, межстрочный интервал одинарный. Абзацный отступ -0,5 см. Объем статьи не более 5-8 страниц.
2. Текст статьи должен состоять из следующих разделов:
 - введение (актуальность вопроса, современное состояние проблемы);
 - цель исследования, постановка проблемы;
 - методы решения и апробация проблемы;
 - применение полученных результатов;
 - выводы.
3. Статья должна быть оформлена в следующем порядке: название статьи – посередине, заглавными буквами, жирным шрифтом, в конце пустая строка; имя, фамилия и отчество авторов должны быть написаны четко – посередине, жирным шрифтом; место работы, город, страна и адрес электронной почты авторов – курсивом; номера ORCID авторов – посередине курсив, в конце пустая строка; резюме (мин. 100 слов, макс. 200 слов); ключевые слова (3-5 слов) – курсивом; введение и остальные подзаголовки – слева, жирным шрифтом, пустая строка в начале.
Название статьи, имя, фамилия и отчество авторов, аннотация и ключевые слова должны быть представлены на языке статьи и на английском языке. Если статья написана на английском языке, вышеуказанное должно быть написано только на английском языке.
4. Библиография: название каждого цитируемого источника нумеруется в соответствии с порядком его использования в статье, без перевода. Ссылки в тексте даны следующим образом:
 - если цитируемая работа является журнальным материалом, она указывается в квадратных скобках внутри текста (например, [3]). В списке литературы указываются фамилия и инициалы авторов работы, название работы, название журнала, год издания, серия или номер, страницы.
Например, 3. Аманов Ю.А. О методике определения напряжений, возникающих в зоне контакта металла с абразивом. Научные труды АзТУ, 2021, №1, с. 65-71.
 - если ссылочная работа является книжным материалом, номер ссылки и межстраничный интервал работы в книге указываются в квадратных скобках внутри текста (например, [9, с. 120-122]). В списке литературы указываются фамилия и инициалы авторов, название произведения, название города, наименование издательства, год издания, общее количество страниц книги.
Например, 9. Джумшудов С.Г. Принятие управленческих решений. Баку, «НПМ Образование», 2010, 160 с.
5. Таблицы и рисунки в статье нумеруются: таблица — над таблицей, курсивом, справа (например, *Таблица 1*), рисунок — под рисунком, курсивом, посередине (например, *Рис. 1.*), таблицы должны быть отделены от текстовой части (сверху и снизу) пустыми строками. Таблицы следует размещать непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь свой заголовок. Единицы измерения должны быть указаны в таблицах. Изображения должны быть четкими и представлять собой единый объект (искусственная группировка отдельных изображений не допускается).
6. Единицы измерения, используемые в статье, должны соответствовать международной системе единиц измерения. Кроме принятых слов (и т.д. и т.п.), нельзя использовать сокращенные слова.
7. Формулы компилируются в Microsoft Equation по стандартным параметрам. Нумеруются только формулы, используемые в тексте. Номер формулы указывается в скобках справа.
8. При отправке статьи в редакцию указываются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, место работы, должность, номер ORCID, раздел, к которому относится статья, номер телефона и адрес электронной почты. Также необходимо указать адрес.
9. Статьи, поступившие в редколлегия, передаются на рецензирование, получившие положительные отзывы статьи, рекомендуются к публикации.

Nəşriyyatın direktoru: *Xəlil Nəbiyev*
Dizayner: *Fuad Vəliyev*

Formatı: 60x84 $\frac{1}{8}$
Həcmi: 14 ç.v.
Tirajı: 500

Jurnal AzTU Press Nəşriyyatının mətbəəsində çap olunmuşdur.

