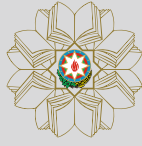


ISSN 1815-1779



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

УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ
Научно-технический журнал

№1
2026

Bakı – 2026

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 HEYƏTI

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.Alırızayev (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, metallurqiya, maşınşünaslıq, 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

Məryam İqbal qızı Məmmədli – LU240 ultrasəs sensoru əsasında su kanallarında sərfin ölçülməsi və idarəetmə qurğusunun işlənməsi.....	5–12
Aynura Manaf İsmayilova – Analysis of factors affecting the role of vocational training on the international labor market.....	13–20
Arzu Jamil Safarli – Sustainable development strategy of the Azerbaijan Aluminium Industry under CBAM	21–26
Ceyhun Gülməmməd oğlu Hacıyev, Ziya Rafiq oğlu İsgəndərov, Sənan Taleh oğlu Məmmədov – Davranış iqtisadiyyatı və qərar qəbuletmə: koqnitiv qərəzlər, evristika və siyasət nəticələri.....	27–33
Gulnar Majid Nəghiyeva, Firudin Tarlan Aghayev – AI-powered chatbots in digital communication: NLP architecture, applications and ethical challenges.....	34–39
Vüqar İbrahim oğlu Salmanov, Rəhimə Yusif qızı Hacıyeva – Pascal proqramlaşdırma dili: sistematik tədris metodologiyası və müasir informasiya sistemlərində tətbiqi.....	40–46
Alakbar Taghi Valizada – PioAgent: A hybrid finite-state framework for deterministic orchestration of LLM agentic workflows.....	47–53
Nizami Dəmir oğlu Yusubov, Heyran Mürşüd qızı Abbasova, Ramil Yengibar oğlu Dadaşov – RPI torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı çoxmeyarlı optimallaşdırma və süni intellekt yanaşmaları.....	54–61
Javid Azer Mustafayev – Analysis of energy loss mechanisms in process furnaces and engineering strategies for thermal efficiency enhancement	62–67
Tural Latif Gojayev – Application of Fuzzy AHP-MOORA method for polymeric nanocomposite material selection.....	68–72
Лейла Мамед кызы Гасратова – Исследование и выявление проблем Апшеронской кольцевой железной дороги.....	73–79
Asya Fərhad qızı Şahverdiyeva – Sis-9 oktadekan və tridekan turşularının trietanolaminlə əmələ gətirdikləri kompleks duzların bakterisid xassələrinin tədqiqi	80–85

LU240 ULTRASƏS SENSORU ƏSASINDA SU KANALLARINDA SƏRFİN ÖLÇÜLMƏSİ VƏ İDARƏETMƏ QURĞUSUNUN İŞLƏNİLMƏSİ

Məryam İqbal qızı Məmmədli

Azərbaycan Memarlıq və İnşaat universiteti, Bakı, Azərbaycan

MICROPROCESSOR-BASED SYSTEM FOR REAL-TIME MEASUREMENT AND CONTROL OF OPEN-CHANNEL DISCHARGE USING THE SITRANS PROBE LU240 ULTRASONIC SENSOR

Maryam Iqbal Mammadli

Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan: maryammammadli@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5578-4517>

Abstract. The article investigates the development of a microprocessor-based intelligent measurement and control system for measuring and automatically regulating water flow in open channels. The proposed system is built on the 4-20 mA standard analog output of the LU-240 ultrasonic level sensor operating based on the ultrasonic measurement principle. The analog current signal generated by the sensor is transmitted to the analog input of an STM32F103 microcontroller via a current-to-voltage converter, where it is digitized and scaled. The measured level values are converted into flow rate values by considering the hydraulic characteristics of the open channel and are processed at the software level. The functional structure of the system includes a measurement module, a microprocessor-based processing unit, an EEPROM memory unit, an I2C interface graphic LCD display, an RF communication module, and a power supply unit. The device power supply is organized based on a solar panel and a lithium-polymer battery, ensuring long-term and uninterrupted operation without dependence on an external power source. The system also provides capabilities for remote data transmission and integration with SCADA systems. The proposed intelligent device can be recommended as an effective and economically feasible solution for flow measurement and automatic control in open water channels, reservoirs, and similar hydraulic structures.

Keywords: water discharge, LU-240, ultrasonic sensor, STM32F103, SCADA.

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Giriş. Açıq su kanallarında su sərfinin ölçülməsi hidrometrik müşahidələrin əsasını təşkil edir və su ehtiyatlarının planlaşdırılması, paylanması və səmərəli idarə olunmasında mühüm rol oynayır. Beynəlxalq hidrometrik təcrübədə açıq kanallarda axının ölçülməsi su resurslarının idarə olunmasının fundamental elementi kimi qəbul olunur və bu prosesin düzgün təşkili ölçmə nəticələrinin etibarlılığına birbaşa təsir göstərir [1, s. 1–2].

Azərbaycan Respublikası su təminatı baxımından məhdud su ehtiyatlarına malik ölkələr sırasına daxildir və bu səbəbdən mövcud su resurslarından rəşional istifadə məsələsi xüsusi aktualıq kəşb edir. Su anbarları və onlardan qidalanan açıq su kanallarında tələbatçılara verilən su sərfinin düzgün və operativ şəkildə təyin edilməsi su itkilərinin azaldılması və su balansının qorunması baxımından əsas problemlərdən biri hesab olunur. Xanbulançay su anbarı timsalında aparılmış tədqiqatlarda göstərilmişdir ki, çıxış kanallarında su sərfinə operativ nəzarətin təmin edilməsi üçün müasir informasiya-ölçmə və idarəetmə sistemlərinin tətbiqi zəruridir [2].

Hazırda açıq su kanallarında su sərfinin təyin edilməsi əsasən empirik tənliklərə və hidravlik hesablamaya üsullarına əsaslanır. Açıq kanal axınlarında sərf təyini üçün sürət-sahə üsulu ilə yanaşı, Manning tənliyi və digər empirik asılılıqlar geniş tətbiq olunur. Bu üsullar müəyyən istismar şəraitlərində qənaətbəxş nəticələr versə də, empirik əmsalların kanal yatağının vəziyyətindən asılı olaraq dəyişməsi hidravlik hesablamaların nəticələrinə birbaşa təsir göstərir və ölçmə xətalalarının yaranmasına səbəb ola bilər. Bu səbəbdən ölçmə məlumatlarının avtomatlaşdırılmış şəkildə toplanması və emalı müasir hidrometrik sistemlər üçün zəruri hesab olunur [3].

Açıq su kanallarında sərfin səviyyə ölçmələrinə əsasən hesablanması üçün ən geniş tətbiq olunan empirik asılılıqlardan biri Manning tənliyidir [3]:

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} A$$

v – orta sürət (m/s);

- R – hidravlik radius (en kəsik sahəsi/nəm mühit) (m);
- J – kanal əyrisi (m/m);
- n – Gauckler-Manning əmsalı ($m^{-1/3}$ x san);
- A – axan suyun en kəsiyi sahəsi (m^2);
- P – su ilə təmasda olan kəsik sahəsinin perimetri və ya yaş perimetri (m).

Müasir hidrometriyada su sərfi hidrologiyanın ən mühüm ölçmələrindən biri hesab olunur və bu göstəricinin dəqiqliyi bir hövzədə baş verən hidroloji proseslərin düzgün qiymətləndirilməsi üçün həlledici əhəmiyyət daşıyır. Aparılmış tədqiqatlarda göstərilir ki, açıq kanal axınlarında sərfin ölçülməsi zamanı ənənəvi üsulların tətbiqi ilə yanaşı, müasir ölçmə cihazları və avtomatlaşdırılmış monitoring sistemlərinə ehtiyac getdikcə artmaqdadır [4].

Son illərdə ölçmə texnologiyalarının inkişafı açıq su kanallarında sərfin təmassız üsullarla ölçülməsinə və ölçmə prosesinin avtomatlaşdırılmasına imkan yaratmışdır. Ultrasəs ölçmə prinsipinə əsaslanan səviyyə sensorları mexaniki aşınmanın olmaması, uzunmüddətli istismar və sərt mühit şəraitində etibarlı işləmə xüsusiyyətləri ilə seçilir. Sənaye avtomatikasında 4-20 mA analoq çıxış interfeysi ölçmə məlumatlarının uzun məsafələrə və elektromaqnit maneələrə davamlı şəkildə ötürülməsi məqsədilə tətbiq olunur [5, s. 1–2].

Açıq su kanallarında yalnız ölçmənin deyil, həm də ölçmə nəticələrinə əsaslanan avtomatik idarəetmənin təşkili hidravlik rejimin stabil saxlanması üçün xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Nasosların və ya tənzimləyici klapaların drayver vasitəsilə idarə olunması su sərfinin normativ hədlərdə saxlanılmasına və insan faktorunun minimuma endirilməsinə imkan verir.

Bu işin məqsədi ultrasəs ölçmə prinsipinə əsaslanan LU-240 tipli səviyyə sensoru, STM32 əsaslı mikroprosessorlu idarəetmə bloku və drayver vasitəsilə avtomatik idarəetmə tətbiq etməklə açıq su kanallarında su sərfinin ölçülməsi və tənzimlənməsi üçün intellektual ölçmə-idarəetmə qurğusunun işlənilməsi və tədqiqindən ibarətdir.

Məsələnin qoyuluşu. Açıq su kanallarında su sərfinin ölçülməsi və tənzimlənməsi üçün mövcud ölçmə vasitələrinin təhlili göstərir ki, ölçmə nəticələrinin etibarlılığı ölçmə sisteminin texniki xüsusiyyətlərindən, yerləşmə şəraitindən və ətraf mühit amillərindən birbaşa asılıdır. Bu baxımdan ultrasəs ölçmə prinsipinə əsaslanan mövcud səviyyə sensorları və mikroprosessorlu idarəetmə vasitələri bazasında yeni intellektual ölçmə-idarəetmə qurğusunun işlənilməsi aktual elmi-texniki vəzifə kimi qarşıya çıxır.

Təklif olunan ölçmə-idarəetmə sisteminin işlənilməsi zamanı informasiya-ölçmə və mikroprosessor texnologiyalarının müasir nailiyyətlərindən istifadə edilmiş və açıq su kanalları üçün xarakterik olan əsas parametrlər nəzərə alınmışdır. Bu parametrlərə su səviyyəsinin dəyişməsi, axının hidravlik rejimi, ölçmə qurğusunun yerləşmə şəraiti, eləcə də ətraf mühitin temperaturu daxildir.

İşlənən ölçmə qurğusu aşağıdakı əsas funksiyaların yerinə yetirilməsini təmin etməlidir:

- ultrasəs sensoru vasitəsilə su səviyyəsinin zaman üzrə dəyişməsinin ölçülməsi $h(t)$;
- ölçülmüş səviyyə məlumatları əsasında açıq su kanalında su sərfinin hesablanması $Q(t)$;
- ətraf mühit temperaturunun ölçülməsi və ölçmə nəticələrinə temperatur təsirlərinin nəzərə alınması;
- ölçmə nəticələrinin mikroprosessorlu idarəetmə blokunda emalı və yaddaşda saxlanması;
- ölçmə məlumatlarının növbəti idarəetmə səviyyəsinə ötürülməsi üçün məlumat massivlərinin formalaşdırılması;

Ölçmə-idarəetmə qurğusunun elektron sxemi sənaye mühitində mövcud olan elektromaqnit maneələrə qarşı dayanıqlı olmalı və uzunmüddətli istismar zamanı ölçmə dəqiqliyini saxlamalıdır. Uzaq və enerji təchizatının məhdud olduğu ərazilərdə tətbiq imkanlarını genişləndirmək məqsədilə qurğunun enerji təchizatında kabel xəttindən istifadə edilməməli və günəş enerjisi əsasında qidalanma nəzərdə tutulmalıdır [6, s. 40–45].

Beləliklə, təklif olunan intellektual ölçmə-idarəetmə qurğusunun işlənilməsi zamanı aşağıdakı əsas meyarlar rəhbər tutulmalıdır: aşağı maya dəyəri, quraşdırmanın sadəliyi, ölçmə həssaslığının və

dəqiqliyinin yüksək olması, istismar etibarlılığı, eləcə də müxtəlif hidravlik şəraitlərə uyğunlaşma imkanlarının mövcudluğu.

İntellektual ölçmə-idarəetmə qurğusunun işlənilməsi. Açıq su kanallarında su səviyyəsinin fasiləsiz və etibarlı ölçülməsi su sərfinin düzgün hesablanması əsas şərtlərdən biridir. Bu məqsədlə təklif olunan ölçmə-idarəetmə sistemində ilkin çevirici qismində ölçüləcək məsafəni 4-20 mA diapazonunda cərəyana çevirə bilən sənaye tipli SITRANS LU240 ultrasəs səviyyə sensoru seçilmişdir. Sensorun seçilməsi zamanı açıq kanallarda ölçmə şəraitinə uyğunluq, ölçmə dəqiqliyi, sənaye avtomatikası sistemləri ilə inteqrasiya imkanları və istismar etibarlılığı əsas meyarlar kimi qəbul edilmişdir. Açıq su kanallarında su sərfinin dəqiq müəyyən edilməsi birbaşa su səviyyəsinin etibarlı ölçülməsindən asılıdır. Bu məqsədlə təklif olunan ölçmə-idarəetmə sistemində əsas ölçmə elementi kimi sənaye tipli ultrasəs səviyyə sensoru SITRANS LU240 seçilmişdir. Sensorun seçimi onun təmassız ölçmə prinsipi, sənaye avtomatikası sistemləri ilə uyğunluğu və açıq kanallarda tətbiq imkanları nəzərə alınmaqla əsaslandırılmışdır [5, s. 2–4].

SITRANS LU240 ultrasəs impulslarının su səthinə ötürülməsi və əks olunmuş siqnalın geri qayıtma vaxtının ölçülməsi prinsipi əsasında işləyir. Ölçülmüş vaxt intervalına əsasən sensorla su səthi arasındakı məsafə müəyyən edilir və bu məsafə kanalın konstruktiv xüsusiyyətləri nəzərə alınmaqla su səviyyəsinin cari qiymətinə çevrilir [5, s. 3–4]. Təmassız ölçmə üsulu açıq kanallarda çöküntülər, yosunlaşma və mexaniki təsirlər nəticəsində yaranan ölçmə xətalalarının qarşısını almağa imkan verir. Sensorun mühüm üstünlüklərindən biri ölçmə nəticələrinin 4-20 mA analoq çıxış siqnalı şəklində formalaşdırılmasıdır. Aşağı həddin 4 mA səviyyəsində formalaşdırılması xətt qırılması və sensor nasazlığı hallarının operativ aşkarlanmasına şərait yaradır [9, s. 12–15].

Açıq kanal sistemlərində sərfin təyini səviyyə ölçmələrinə əsaslanan əvvəlcədən müəyyən edilmiş hidravlik asılılıqlar vasitəsilə həyata keçirilir. Bu yanaşma Parshall flumları, V-şəkilli ölçmə bəndləri və digər açıq kanal qurğularında geniş tətbiq olunur. Beləliklə, LU240 sensoru səviyyə ölçmələri əsasında yalnız su hündürlüyünün deyil, həm də həcm və həcm sərfinin avtomatik hesablanmasına imkan yaradır.

Ətraf mühit temperaturunun dəyişməsi ultrasəs ölçmələrində siqnalın yayılma sürətinə təsir göstərə bildiyindən ölçmə xətalalarının yaranmasına səbəb ola bilər. SITRANS LU240 ultrasəs səviyyə sensorunda temperatur kompensasiyası daxili şəkildə reallaşdırılmışdır və istehsalçı tərəfindən ölçmə alqoritminin temperatur diapazonu üzrə avtomatik korrektə edildiyi göstərilir [10].

Temperatur kompensasiyası ölçmə nəticələrinin müxtəlif iqlim və mövsüm şəraitlərində stabilliyini təmin edir və açıq su kanalları üçün vacib texniki üstünlük hesab olunur.

Ultrasəs ölçmələrində səsin havada yayılma sürətinin temperaturdan asılılığı aşağıdakı yaxınlaşma ilə ifadə olunur [11, s. 58–62]:

$$c(T) = 332 + 0.6T$$

burada T – temperaturdur ($^{\circ}\text{C}$).

Beləliklə, SITRANS LU240 ultrasəs səviyyə sensorunun tətbiqi açıq su kanallarında səviyyənin fasiləsiz və etibarlı ölçülməsini, səviyyə əsasında sərfin avtomatik hesablanması və ölçmə məlumatlarının sənaye tipli idarəetmə sistemlərinə ötürülməsini təmin edən funksional və etibarlı texniki həll kimi qiymətləndirilə bilər.

Açıq su kanallarında su sərfinin təyini birbaşa ölçülən su səviyyəsi ilə kanalın hidravlik xüsusiyyətləri arasında mövcud olan asılılıqlara əsaslanır. Ölçmə-idarəetmə sistemində SITRANS LU240 ultrasəs sensoru vasitəsilə əldə edilən səviyyə məlumatları $h(t)$ əvvəlcədən müəyyən edilmiş hidravlik modellərə uyğun olaraq su sərfinin $Q(t)$ hesablanması üçün istifadə olunur [7].

Açıq kanallarda sərfin hesablanması məqsədilə Parshall flumları, V-şəkilli ölçmə bəndləri və digər standart hidravlik qurğular üçün qəbul edilmiş empirik və ya analitik ifadələr tətbiq edilir. Bu ifadələrdə sərf qiyməti ölçülən səviyyə göstəricisinin qeyri-xətti funksiyası kimi təyin olunur və

kanalın geometrik parametrləri nəzərə alınır. Belə yanaşma beynəlxalq normativ sənədlərdə və hidrometrik təcrübədə geniş istifadə olunur [8, s. 150–160].

LU240 sensorundan daxil olan səviyyə siqnalları mikroprosessorlu idarəetmə blokunda rəqəmsal formaya çevrilir və proqram təminatında reallaşdırılmış alqoritm vasitəsilə cari sərf qiyməti hesablanır. Hesablanmış sərf məlumatları real vaxt rejimində monitoring üçün istifadə olunur və texnoloji prosesin avtomatik idarə olunması məqsədilə növbəti idarəetmə səviyyəsinə ötürülür.

Beləliklə, səviyyə ölçmələri əsasında su sərfinin avtomatik hesablanması ölçmə prosesinin operativliyini artırır, insan faktorundan asılılığı azaldır və açıq su kanallarında su ehtiyatlarının səmərəli idarə olunmasına imkan yaradır.

SITRANS LU240 ultrasəs səviyyə sensorundan alınan ölçmə məlumatları sənaye avtomatı-kasında geniş tətbiq olunan 4-20 mA analoq cərəyan siqnalı şəklində formalaşdırılır. Bu tip siqnal ötürülməsi uzun məsafələrdə yüksək səs-küyə və elektromaqnit maneələrə davamlılığı ilə seçildiyindən ölçmə sistemlərinin etibarlılığını artırır. Lakin mikrokontroller əsaslı idarəetmə qurğularında analoq girişlər gərginlik siqnalları ilə işlədiyindən 4-20 mA cərəyan siqnalının uyğun gərginlik diapazonuna çevrilməsi zəruridir [5].

Bu məqsədlə ölçmə dövrəsində cərəyan-gərginlik çeviricisi tətbiq olunur və ölçmə siqnalı mikrokontrollerin analoq-rəqəm çeviricisinin (ARÇ) qəbul edə biləcəyi gərginlik diapazonuna uyğunlaşdırılır. Çevirici mərhələsi yalnız siqnalın uyğunlaşdırılmasını deyil, eyni zamanda ölçmə xəttində yaranan elektromaqnit təsirlərin və impuls xarakterli maneələrin azaldılmasını da təmin edir. Bunun üçün analoq dövrdə filtrasiya elementlərindən istifadə olunaraq ölçmə siqnalının sabitliyi və ölçmə dəqiqliyi artırılır [12].

İlkin analoq emal mərhələsində miqyaslama əməliyyatları həyata keçirilir və 4-20 mA diapazonu proqram təminatında emal üçün əlverişli ölçmə intervalına uyğunlaşdırılır. Nəticədə, çevrilmiş və filtrasiya olunmuş analoq siqnal mikrokontrollerin ARÇ moduluna ötürülərək rəqəmsal formaya çevrilir və növbəti mərhələdə proqram təminatı səviyyəsində emal olunur. Bu yanaşma ölçmə məlumatlarının dəqiqliyini və etibarlılığını artırmaqla yanaşı, açıq su kanallarında səviyyə və sərf ölçmələrinin avtomatlaşdırılmış idarəetmə sistemlərinə inteqrasiyasını təmin edir.

İlkin analoq çevirmə və siqnalın uyğunlaşdırılması mərhələsindən sonra ölçmə məlumatlarının emalı və idarəetmə qərarlarının formalaşdırılması mikroprosessorlu idarəetmə bloku vasitəsilə həyata keçirilir. Təklif olunan ölçmə-idarəetmə sistemində bu məqsədlə STM32 ailəsinə məxsus mikrokontroller tətbiq edilmişdir. Mikrokontroller ölçmə sisteminin bir elementi kimi çıxış edərək analoq-rəqəm çevirmə, ölçmə məlumatlarının proqram təminatı səviyyəsində emalı, nəticələrin yadda saxlanması və idarəedici siqnalların formalaşdırılması funksiyalarını yerinə yetirir [13 s. 215-220].

Mikrokontrollerin analoq-rəqəm çeviricisi vasitəsilə rəqəmsal formaya çevrilmiş ölçmə məlumatları proqram təminatında reallaşdırılmış zaman üzrə sürüşən orta alma (time-based moving average) rəqəmsal filtrasiya alqoritmi əsasında emal olunur [14, s. 277–284].

Şəkil 1-də açıq su kanalında səviyyə və sərfin ölçülməsi üçün təklif olunan ölçmə-idarəetmə qurğusunun modul sxemi təqdim edilmişdir. Modul sxemin əsas elementləri ultrasəs səviyyə sensoru SITRANS LU240, ölçmə-idarəetmə bloku, enerji təchizatı sistemi və məlumat ötürmə interfeysindən ibarətdir. Ultrasəs sensoru kanal üzərində yerləşdirilərək su səthinə impulsar göndərir və əks olunan siqnalın geri qayıtma vaxtına əsasən cari su səviyyəsini ölçür. Sensorun çıxışında formalaşan 4–20 mA analoq siqnal ölçmə-idarəetmə blokuna ötürülür və burada ilkin çevirmə və emal mərhələlərindən keçirilir. Ölçülmüş səviyyə məlumatları əsasında su sərfinin hesablanması həyata keçirilir və əldə olunan nəticələr monitoring və idarəetmə məqsədləri üçün istifadə olunur. Qurğunun enerji təchizatı günəş paneli və akkumulyator batareyası vasitəsilə təmin edilir ki, bu da sistemin elektrik şəbəkəsindən asılı olmadan, avtonom rejimdə işləməsinə imkan yaradır.

Şəkil 2-də təklif olunan sistemin struktur (prinsipial) sxemi göstərilmişdir. Struktur sxemə ultrasəs səviyyə sensoru, analoq siqnalın çevrilməsi və uyğunlaşdırılması bloku, mikroprosessorlu idarəetmə bloku, enerji təchizatı sistemi və icraedici mexanizmlərin idarə olunması üçün drayver daxildir.



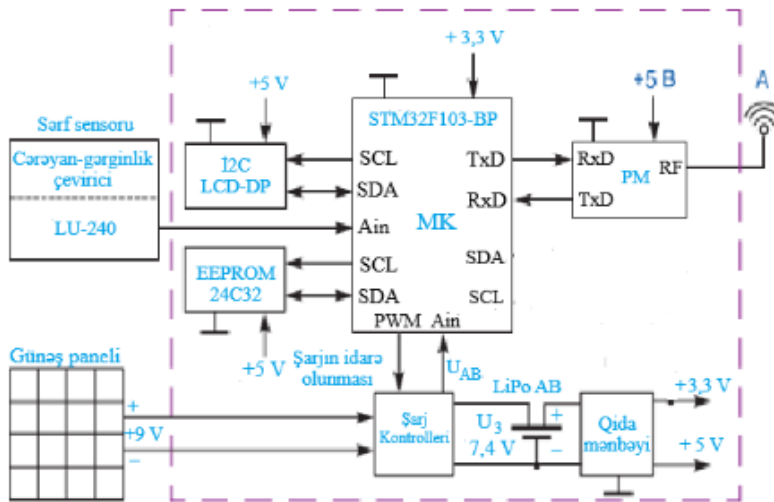
Şəkil 1. Kanalda yerləşdirilmiş LU240 ultrasəs sensoru

Ultrasəs sensorundan daxil olan 4-20 mA analoq siqnal cərəyan-gərginlik çeviricisi vasitəsilə mikrokontrollerin analoq girişlərinə uyğun gərginlik diapazonuna çevrilir. İlk analoq emal mərhələsində filtrasiya və miqyaslama əməliyyatları yerinə yetirilir. Emal olunmuş siqnal mikrokontrollerin analoq-rəqəm çeviricisinə ötürülərək rəqəmsal formaya çevrilir və proqram təminatı səviyyəsində emal olunur.

Hesablanmış sərf qiymətləri əsasında mikrokontroller tərəfindən idarəedici siqnallar formalaşdırılır və bu siqnallar drayver vasitəsilə tənzimləyici mexanizmlərin iş rejiminə təsir göstərir. Beləliklə, ölçmə və idarəetmə prosesləri vahid sistem çərçivəsində avtomatik şəkildə həyata keçirilir.

İlkin analoq çevrilmə və siqnalın uyğunlaşdırılması mərhələsindən sonra ölçmə məlumatlarının emalı və idarəetmə qərarlarının formalaşdırılması mikroprosessorlu idarəetmə bloku vasitəsilə həyata keçirilir [12]. Bu məqsədlə təklif olunan ölçmə-idarəetmə sistemində STM32 ailəsinə məxsus STM32F103 tipli mikrokontroller tətbiq edilmişdir.

STM32F103 mikrokontrolleri ölçmə-idarəetmə sisteminin mərkəzi funksional elementi kimi çıxış edərək analoq-rəqəm çevirmə, ölçmə məlumatlarının proqram təminatı səviyyəsində emalı, nəticələrin yadda saxlanması və idarəedici siqnalların formalaşdırılması funksiyalarını yerinə yetirir [12]. Mikrokontroller ARM Cortex-M3 nüvəsi əsasında qurulmuşdur və 72 MHz takt tezliyində işləmə imkanına malikdir ki, bu da ölçmə məlumatlarının real vaxt rejimində emalı üçün kifayət qədər hesablama məhsuldarlığını təmin edir [13, s. 22–30].



Şəkil 2. 4-20 mA çıxışlı LU240 sensoru əsasında su kanalında sərfin ölçülməsi və avtomatik idarə olunması üçün struktur sxemi

Rəqəmsallaşdırılmış ölçmə məlumatları mikrokontrollerin daxili operativ yaddaşında (SRAM) saxlanılır və proqram təminatında reallaşdırılmış alqoritm əsasında emal olunur. Bu mərhələdə ultrasəs sensoru vasitəsilə ölçülmüş səviyyə siqnallarının zaman üzrə dəyişməsi təhlil edilir, ölçmə səs-küyünün təsirinin azaldılması məqsədilə rəqəmsal filtrasiya üsullarından istifadə olunur və cari su sərfi qiyməti əvvəlcədən müəyyən edilmiş hidravlik hesablama modeli əsasında hesablanır [12].

Hesablanmış sərf qiymətləri mikrokontroller tərəfindən verilmiş normativ və texnoloji parametrlərlə müqayisə edilir və müqayisənin nəticəsindən asılı olaraq idarəedici siqnallar formalaşdırılır. Bu siqnallar mikrokontrollerin GPIO və zamanlayıcı (timer) modulları vasitəsilə drayverə ötürülür və nasosların və ya elektrikle idarə olunan tənzimləyici klapanların iş rejiminə təsir göstərir [11, s. 310–325].

STM32F103 mikrokontrollerinin periferiya modulları ölçmə nəticələrinin vizuallaşdırılması və yadda saxlanması funksiyalarını da təmin edir. PC interfeysi üzərindən qoşulmuş qrafik LCD displey vasitəsilə cari su səviyyəsi və hesablanmış su sərfi qiymətləri real vaxt rejimində əks olunur, EEPROM yaddaş qurğusunda isə kalibrəmə əmsalları və sistem parametrləri saxlanılır [12].

Bundan əlavə, STM32F103 mikrokontrollerinin USART interfeysi RF rabitə modulu ilə əlaqə yaradaraq ölçmə məlumatlarının uzaq məsafəyə ötürülməsinə və SCADA tipli yuxarı səviyyəli idarəetmə sistemlərinə inteqrasiyasına imkan verir. Mikrokontrollerin aşağı enerji sərfiyyatı və müxtəlif enerji qənaət rejimlərinin mövcudluğu qurğunun günəş paneli və akkumulyator əsasında uzunmüddətli avtonom istismarını təmin edən mühüm texniki üstünlük hesab olunur [13, s. 22–30].

Beləliklə, STM32F103 mikrokontrollerinin funksional və texniki imkanları təklif olunan ölçmə-idarəetmə sistemində ölçmə məlumatlarının real vaxt rejimində emalı, avtomatik idarəetmə qərarlarının formalaşdırılması və açıq su kanallarında su sərfinin stabil tənzimlənməsi üçün etibarlı texniki baza yaradır [11, s. 11–15].

Ölçmə məlumatlarının mikroprosessorlu idarəetmə blokunda emalından sonra su sərfinin tənzimlənməsi məqsədilə formalaşdırılan idarəedici siqnallar drayver modulu vasitəsilə icraedici mexanizmlərə ötürülür. Drayver modulu mikrokontrollerin aşağı səviyyəli idarəetmə siqnallarını nasos aqreqatları və ya elektrikle idarə olunan tənzimləyici klapanların işləməsi üçün tələb olunan gərginlik və cərəyan səviyyəsinə uyğunlaşdırır ki, bu yanaşma sənaye avtomatikasında aktuatorların idarə olunması üçün geniş tətbiq edilir [11, s. 115–130].

Açıq su kanallarında su sərfinin avtomatik tənzimlənməsi üçün icraedici mexanizm kimi ən çox nasos aqreqatları və solenoid tipli tənzimləyici klapanlardan istifadə olunur. Bu tip icraedici qurğuların birbaşa mikrokontrollerin çıxışlarından idarə edilməsi mümkün olmadığından, drayver mərhələsi vasitəsilə güc gücləndirilməsi və elektrik izolyasiyası həyata keçirilir [16, s. 55–75].

Drayver əsaslı idarəetmə strukturu ölçmə-idarəetmə sistemində qapalı dövrə prinsipinin reallaşdırılmasına imkan yaradır. Belə ki, mikrokontroller tərəfindən hesablanmış cari su sərfi normativ və ya texnoloji sərf göstəricisi ilə müqayisə edilir və yaranan fərq əsasında icraedici mexanizmin iş rejimi avtomatik olaraq tənzimlənir. Bu yanaşma proses avtomatikasında stabilliyin və etibarlılığın təmin edilməsi baxımından effektiv hesab olunur [15, s. 21–23].

Sənaye tətbiqlərində istifadə olunan drayver modulları yüksək cərəyanlı yük rejimlərində etibarlı işləmək üçün müxtəlif qoruyucu elementlərlə təchiz olunur. Bu elementlərə qısaqapanmadan mühafizə, induktiv yüklərdən yaranan geriye elektromaqnit impulslarının söndürülməsi (flyback protection) və istilik qorunması daxildir ki, bu da həm icraedici mexanizmlərin, həm də idarəetmə elektronikasının uzunmüddətli istismarını təmin edir.

Beləliklə, mikroprosessorlu idarəetmə blokunun drayver vasitəsilə nasos və ya tənzimləyici klapanlara təsir göstərməsi açıq su kanallarında su sərfinin avtomatik və çevik şəkildə tənzimlənməsinə imkan yaradır. Bu isə ölçmə nəticələrinə əsaslanan qərarların operativ icrasını təmin etməklə sistemin funksional etibarlılığını və idarəetmə dəqiqliyini artırır [15, s. 20–25].

Ölçmə-idarəetmə qurğusunun enerji təchizatı sistemi günəş paneli, şarj kontrolleri və akkumulyator batareyası əsasında təşkil edilmişdir. Günəş paneli vasitəsilə ətraf mühətdən alınan enerji akkumulyator batareyasında toplanaraq qurğunun fasiləsiz işləməsinə təmin edir. Bu yanaşma ölçmə-

idarəetmə sisteminin xarici elektrik şəbəkəsindən asılılığını aradan qaldırmaqla onun uzaq və çətin ölçətan ərazilərdə tətbiq imkanlarını genişləndirir.

Akkumulyator batareyasında toplanan enerji stabilizasiya olunmuş qida mənbəyi vasitəsilə ölçmə-idarəetmə qurğusunun funksional blokları üçün tələb olunan gərginlik səviyyələrinə uyğunlaşdırılır. Enerji təchizatı sistemində tətbiq olunan bu həll mikroprosessorlu idarəetmə blokunun, ölçmə modullarının, rabitə vasitələrinin və vizuallaşdırma qurğularının etibarlı və stabilləşdirilmiş enerji ilə təmin olunmasına imkan yaradır.

Günəş enerjisi əsasında qurulmuş enerji təchizatı sistemi ölçmə-idarəetmə qurğusunun uzunmüddətli avtonom istismarını təmin etməklə yanaşı, istismar xərclərinin azaldılmasına və sistemin ümumi etibarlılığının artırılmasına xidmət edir. Bu cür enerji təchizatı həlli açıq su kanalları, su anbarları və oxşar hidravlik obyektlərdə ölçmə və avtomatik idarəetmə sistemlərinin tətbiqi üçün məqsədəuyğun hesab olunur.

Nəticə. Aparılmış tədqiqatlar göstərir ki, açıq su kanallarında su sərfinin fasiləsiz, dəqiq və operativ şəkildə ölçülməsi və tənzimlənməsi su ehtiyatlarının səmərəli idarə olunması baxımından mühüm elmi-texniki əhəmiyyətə malikdir. Məqalədə ultrasəs ölçmə prinsipinə əsaslanan SITRANS LU240 tipli səviyyə sensoru və STM32F103 mikrokontrolleri əsasında qurulmuş intellektual ölçmə-idarəetmə sisteminin strukturu və iş prinsipi işlənmişdir. Təklif olunan sistemdə ultrasəs sensoru vasitəsilə ölçülən su səviyyəsi məlumatları cərəyan-gərginlik çeviricisi və analoq-rəqəm çevirmə mərhələsindən sonra mikroprosessorlu idarəetmə blokunda proqram təminatı səviyyəsində emal olunmuş və açıq kanalın hidravlik xüsusiyyətləri nəzərə alınmaqla su sərfi müəyyən edilmişdir. Sistemin struktur sxemində simsiz rabitə modulunun tətbiqi ölçmə məlumatlarının real vaxt rejimində uzaq məsafəyə ötürülməsinə və yuxarı səviyyəli monitorinq sistemlərinə inteqrasiyasına imkan yaratmışdır. Günəş enerjisi və akkumulyator batareyası əsasında qurulmuş enerji təchizatı isə ölçmə-idarəetmə qurğusunun xarici elektrik şəbəkəsindən asılı olmadan, avtonom rejimdə uzunmüddətli istismarını təmin etmişdir. Aparılmış təhlillər göstərir ki, təklif olunan intellektual ölçmə-idarəetmə sistemi açıq su kanallarında su sərfinin ölçülməsi və tənzimlənməsi üçün funksional, çevik və iqtisadi cəhətdən məqsədəuyğun texniki həll hesab oluna bilər. Sistemin modullu quruluşu onun müxtəlif hidravlik obyektlərə uyğunlaşdırılmasına, sənaye avtomatikası və SCADA sistemləri ilə inteqrasiyasına geniş imkanlar yaradır. Gələcək tədqiqatlarda təklif olunan sistemin real istismar şəraitində uzunmüddətli sınaqlarının aparılması, müxtəlif kanal profilləri üçün hidravlik modellərin dəqiqləşdirilməsi və simsiz rabitə texnologiyalarının optimallaşdırılması məqsədəuyğun hesab olunur.

ƏDƏBİYYAT

1. ISO 1438:2008. Hydrometry – Open channel flow measurement using thin-plate weirs. Geneva, International Organization for Standardization, 2008, 22 p.
2. Həsənov A.B., Abbasov Z.A., Rzayev A.H., Yəhyayev V.F., Əliyev Y.Q., Rezvan M.H., Məmmədli M.İ. Xanbulançay su anbarından tələbatçıya verilən su sərfinin hesablanma alqoritmləri və sistemi. Su problemləri Elm və Texnologiyalar, 2025, №1, s. 126–134.
3. Rzayev A.H., Məmmədli M.İ. Kanallarda su sərfiyyatının empirik tənliklərlə hesablanma üsullarının tədqiqi. AzMİU-nun Elmi əsərləri, 2025, №1, s. 132–139.
4. Rzayev A.H., Məmmədli M.İ. Su sərfiyyatının ölçmə cihazları və üsullarının icmalı. SDU-nun Elmi xəbərləri, Təbiət və Texnika Elmləri Seriyası, 2025, №2, s. 63–67.
5. Siemens AG. SITRANS Probe LU240 – Ultrasonic Level Transmitter: Product Overview. Germany, Siemens Process Instrumentation 2024, 9 p.
6. Rantz S.E. et al. Measurement and Computation of Streamflow. Washington, U.S. Geological Survey 1982, Vol 1–2, 631 p.
7. ISO 18365:2013. Hydrometry – Selection, establishment and operation of a gauging station. Geneva, International Organization for Standardization, 2013, 11 p.
8. World Meteorological Organization (WMO). Guide to Hydrological Practices. Geneva, WMO-No.168, 6th Edition, 2008, 296 p.
9. Siemens AG. Operating Instructions: SITRANS Probe LU240 Ultrasonic Level Transmitter. Germany, Siemens Process Instrumentation, 2021, 255 s.

10. HyperPhysics, Georgia State University. Speed of Sound in Air. Available online: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>, (Accessed: 16.01.2026).
11. Bolton W. Instrumentation and Control Systems. Oxford, Elsevier, 2009, 448 p.
12. Рзаев Ас.Г., Алиев Я.Г., Резван М.Г. Интеллектуальный межтранверсный месдозный динамограф штанговых глубинно-насосных установок. Измерительная техника, 2023, №10, с. 49–55.
13. STMicroelectronics. RM0008 Reference Manual – STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx Advanced ARM-based 32-bit MCUs. STMicroelectronics, 2021, 1136 p.
14. Smith S.W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California, California Technical Publishing, 1997, 640 p.
15. Aström K.J., Murray R.M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton, Princeton University Press, 2008, 408 p.
16. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. Oxford, Elsevier, 2019, 480 p.

LU240 ULTRASƏS SENSORU ƏSASINDA SU KANALLARINDA SƏRFİN ÖLÇÜLMƏSİ VƏ İDARƏETMƏ QURĞUSUNUN İŞLƏNİLMƏSİ

M.İ.Məmmədli

Xülasə. Məqalədə açıq su kanallarında su sərfinin ölçülməsi və avtomatik idarə olunması üçün mikroprosessor əsaslı intellektual ölçmə-idarəetmə sisteminin işlənilməsi məsələləri araşdırılmışdır. Təklif olunan sistem ultrasəs ölçmə prinsipinə əsaslanan LU-240 tipli səviyyə sensorunun 4-20 mA standart analoq çıxışı əsasında qurulmuşdur. Sensor tərəfindən formalaşdırılan analoq cərəyan signalı cərəyan-gərginlik çeviricisi vasitəsilə STM32F103 tipli mikrokontrollerin analoq girişinə ötürülür və burada rəqəmsallaşdırılaraq miqyaslaşdırılır. Ölçülən səviyyə qiymətləri açıq kanalın hidravlik xüsusiyyətləri nəzərə alınmaqla sərf qiymətlərinə çevrilir və proqram təminatı səviyyəsində emal olunur. Sistemin funksional quruluşuna ölçmə modulu, mikroprosessorlu emal bloku, EEPROM yaddaş qurğusu, I2C interfeysli qrafik LCD display, RF rabitə modulu və enerji təchizatı bloku daxildir. Qurğunun enerji təminatı günəş paneli və litium-polimer akkumulyator əsasında təşkil edilmişdir ki, bu da onun xarici enerji mənbəyindən asılı olmadan uzunmüddətli və fasiləsiz işləməsini təmin edir. Ölçmə məlumatlarının uzaq məsafəyə ötürülməsi və SCADA sistemlərinə inteqrasiya imkanları da nəzərə alınmışdır. Təklif olunan intellektual qurğu açıq su kanallarında, su anbarlarında və oxşar hidravlik obyektlərdə sərfin ölçülməsi və avtomatik idarə olunması üçün effektiv və iqtisadi cəhətdən məqsədəuyğun həll kimi tövsiyə edilə bilər.

Açar sözlər: su sərfi, LU-240, ultrasəs sensoru, STM32F103, SCADA.

Accepted: 02.06.2026

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE ROLE OF VOCATIONAL TRAINING ON THE INTERNATIONAL LABOR MARKET

Aynura Manaf Ismayilova

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

aynura.ismayilova@aztu.edu.az, <https://orcid.org/0000-0003-4372-6066>

Abstract. In a rapidly globalizing world economy, vocational education and skills development play a decisive role in shaping sustainable and competitive labor markets. As globalization accelerates cross-border investment, industrial transformation, and technological change, the international labor market increasingly demands a highly skilled and adaptable workforce, prompting vocational education systems to undergo strategic reform. Continuous upskilling and reskilling, supported by lifelong learning, have become essential: the WEF estimates that around 39% of workers' core skills will change by 2030, intensifying the need for adaptable, skills-first education and training systems.

This study analyzes new approaches to vocational education against the backdrop of rapid technological development and the globalization of the labor market. It argues that Azerbaijan's vocational education system remains insufficiently aligned with these realities, in particularly technological innovation and the rising requirements of the international labor market. Drawing on the standards and indicators of international organizations such as World Skills, ILO, and UNESCO-UNEVOC, the study diagnoses the system's principal structural and content-related problems, examines the role of university-based Lifelong Learning Centers, and develops evidence-based recommendations for improvement.

Keywords: *lifelong learning, reskilling and upskilling, labor market globalization, technological change, digital skills, employability, Azerbaijan.*

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

INTRODUCTION

Problem background

Vocational skills are fundamental to productivity, innovation, and employment, and a substantial body of recent evidence documents the economic and social returns to investing in them:

- according to the OECD, when workers' skills remain under-used, productivity suffers, innovation slows, and wage progression weakens, making effective use of skills as important as producing them [1];
- the World Bank finds that about two-thirds of the income gap between developed and developing countries can be attributed to differences in human capital, and a 15-point gain in the Human Capital Index is associated with roughly 15% higher future GDP per worker [3];
- in the EU, the employment rate of recent medium-level vocational education graduates (aged 20–34) was 80.0% in 2024, against an EU target of at least 82% by 2025 [4];
- in the field of AI, 46% of leaders cite skill gaps as a major barrier to technology adoption [5];
- around 39% of workers' core skills are expected to change or become outdated by 2030, down from 44% in 2023, reflecting continued but slowing skill instability [2, Figure 3.1];
- if the global workforce were 100 people, 59 would require reskilling or upskilling by 2030, and 11 of them would be unlikely to receive it, leaving them at risk of redundancy [2, Executive Summary];
- skill gaps are seen as the single biggest barrier to business transformation, cited by 63% of employers, while 85% of employers plan to prioritize workforce upskilling [2, Executive Summary];
- job disruption is projected to equal 22% of jobs by 2030, 170 million new roles created and 92 million displaced, a net gain of 78 million [2, Executive Summary];
- UNESCO frames lifelong and adult learning as a catalyst for empowerment and adaptability in the face of digitalization and economic change [6]; reinforcing this, 50% of the workforce has already completed training as part of learning-and-development initiatives, up from 41% in 2023 [2, Section 3];

- LinkedIn reports that 91% of learning-and-development professionals agree continuous learning is more important than ever for career success, while 49% say their executives are concerned that employees lack the skills to execute business strategy [8].

The globalization of vocational education is driven directly by international investment and labor mobility. The ILO's World Employment and Social Outlook: Trends 2025 reports global unemployment of 5% in 2024 but persistently high youth unemployment of 12.6%, and calls for improved vocational training to prepare the workforce for green and AI-driven sectors [7]. As economies become more interconnected, countries increasingly develop vocational education systems that reflect global standards, technological trends, and international labor market dynamics.

Against this background, recent years have seen a marked rise in vocational-education applications from Azerbaijan, especially to Germany through the Ausbildung track and growing efforts to access employment opportunities through this route. This raises two central questions. First, what factors shape the integration of Azerbaijan's vocational education system into modern technological development and the international labor market, and its adaptation to their requirements? Second, how can the employment prospects be improved for "uncompetitive" individuals who possess real skills but graduated from the "old" system and are unaware of the new system's requirements?

For these individuals, two problems emerge prominently: (1) weakening competitiveness in the local labor market, driven by new technologies and rapid technological innovation; and (2) an inability to integrate into or even envision the international labor market, due to a lack of globally aligned skills and certificates and insufficient language and digital competencies.

The purpose of this study is to analyze these problems systematically, diagnose the vocational education system against international indicators, and develop practical recommendations for improvement, including determining the role that university-based Lifelong Learning Centers can play in these processes.

Current situation

The number of vocational schools in Azerbaijan changes from year to year as institutions are merged, restructured, or privatized through reforms. As of early 2024, 92 vocational education institutions were operating, providing technical and vocational education across various fields in both Baku and the regions [9]. In line with the ongoing infrastructure reform, several trends have emerged in recent years: (i) rising enrollment, accompanying growing demand for diverse specialties; (ii) initiatives to restructure and modernize institutions, especially those located in the regions; and (iii) cooperation with countries such as Korea and Germany through international projects and technical-support programs.

Having a look to the brief **statistical review** based on data from the State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan and the Ministry of Science and Education [9] (Table 1-2).

1. *Number of institutions.* At the beginning of 2024, 92 vocational education institutions were operating nationwide, 7 fewer than the previous year (a decrease of about 7.1%).
2. *Enrollment and graduates.* By early 2024, the number of students in vocational schools reached 29,144, an increase of 3,218 (12.4%) over the previous year. Admissions totaled 22,194 (up 1,148, or 5.5%, year on year), and graduates reached 14,645 (up 792, or 5.7%). Relative to 1990, when 82,188 students were enrolled, the 2024 figure represents a decline of roughly 35%.
3. *Low interest in primary vocational education.* In recent years only about 11% of general-education graduates have chosen primary vocational institutions, and total enrollment at that level is only 25,000–27,000, evidence of limited public interest.
4. *Youth not in employment, education, or training (NEET).* According to the State Statistical Committee, the share of young people aged 15–24 not in employment, education, or training was 19.5% in 2023 and 19.8% in 2022 [10]. This indicator follows the ILO sample-survey methodology applied within SDG 8.

5. *Labor market and vocational education.* Labor demand and supply are shaped by the demographic situation, the gender–age structure of the population, working capacity, employment dynamics, labor migration, and education level. The country’s population grew from 7,131,900 in 1990 to 10,180,800 in 2024, yet the number of people pursuing vocational education declined.
6. *Types of institutions.* The system comprises three main institution types: (1) vocational schools; (2) vocational lyceums (now largely merged or liquidated); and (3) vocational education centers (created recently by merging several schools and lyceums through reform).
7. *Distribution.* As of early 2024, of the 92 institutions, 24 were located in Baku and the remainder in the regions. In 2018, 10 specialized centers were established on the basis of 20 former institutions.

Table 1

Vocational education institutions and student numbers, Republic of Azerbaijan, 1990–2023 [9]

Year	Number of institutions (end of year)	Students, persons	of them: girls, persons
1990	176	82,188	33,944
1991	167	75,257	26,340
1992	169	64,734	22,333
1993	167	53,819	16,899
1994	162	42,277	13,275
1995	160	27,689	6,922
1996	119	25,030	8,185
1997	118	24,013	7,852
1998	118	23,527	8,211
1999	108	22,696	8,034
2000	110	22,944	8,420
2001	109	21,619	6,853
2002	109	20,753	6,973
2003	110	21,677	6,622
2004	110	21,563	6,560
2005	107	22,189	6,513
2006	107	23,813	6,825
2007	107	24,455	7,242
2008	108	25,184	7,645
2009	108	25,562	7,514
2010	109	27,330	7,901
2011	108	28,993	8,399
2012	108	30,664	8,746
2013	112	29,234	8,163
2014	113	25,414	6,912
2015	113	24,482	6,453
2016	112	23,814	5,986
2017	111	24,024	5,833
2018	111	23,965	5,552
2019	110	23,193	5,523
2020	103	22,012	5,583
2021	99	22,749	5,942
2022	99	25,926	7,579
2023	92	29,144	8,563

Table 2

Distribution by economic region and administrative-territorial unit, early 2024 [9]

Region / administrative-territorial unit	Institutions	Admitted	Students	Graduates
Republic of Azerbaijan	92	22,194	29,144	14,657
Baku city	24	7,779	11,335	5,254
Nakhchivan Autonomous Republic	3	1,695	–	1,738
Absheron-Khizi	5	986	1,427	572
Mountainous Shirvan	2	462	638	242
Ganja-Dashkasan	8	2,224	2,957	1,458
Karabakh	7	1,237	1,758	642
Gazakh-Tovuz	5	917	1,451	510
Guba-Khachmaz	7	927	1,464	648
Lankaran-Astara	5	1,082	1,507	581
Central Aran	6	1,196	1,568	765
Mil-Mugan	4	660	975	389
Sheki-Zagatala	7	1,754	2,268	1,156
Eastern-Zangezur	4	172	151	92
Shirvan-Salyan	5	1,103	1,645	610

Regulatory and legal framework, strategic documents and projects

State policy in vocational education is implemented by the Vocational Education Agency under the Ministry of Science and Education, established by Presidential Decree in 2016 to coordinate state policy, organize subordinate institutions and prepare competitive, qualified personnel [11]. Under current legislation, institutions take three legal forms. Vocational schools deliver basic primary and technical vocational skills on a traditional, practice-based model, but often with outdated infrastructure and weak labor market adaptation. Vocational high schools combine a secondary qualification with vocational skills and act as a transitional, medium-level form (many reorganized through mergers). Vocational education centers, a product of reforms merging several schools and high schools offer modern infrastructure, a demand-driven spectrum of specialties and a modular, competency-based approach with ICT equipment, industrial partnerships and practical training. Admission is after grades IX and XI: a three-year track (after grade IX) yields both a general-secondary and a vocational certificate, while a one–two-year track (after grade XI) yields a Certificate or Diploma [11].

Specialties span traditional trades (cook, welder, electrician, network administration) to high-technology fields (drone repair, electric/hybrid-vehicle repair, solar-panel installation, medical-equipment service). In 2024/2025, up to 400 students enrolled in 9 new dual-education specialties created in line with modern technologies and labor market demand [11]. Vocational education is supported by several strategic documents: the Strategic Roadmap for VET (2016), the State Strategy for the Development of Education (2013), the Employment Strategy 2019–2030 (Presidential Decree, 2018), and Azerbaijan 2030: National Priorities (2021), which makes “Inclusive and Quality Human Capital” including VET and lifelong-learning centers, a national priority. The National Qualifications Framework for Lifelong Learning (2018) further underpins a culture of lifelong learning and demand-driven skills [12-13].

Vocational education centers: the Korean experience

Among the centers analyzed, the newly established Baku State Vocational Education Center for Industry and Innovation stands out: aligned with Korean standards and expected to operate from 2025 with KOICA support under an intergovernmental agreement [14, 16]. It offers capacity for 1,000 students, 25 specialty laboratories, 7,000 m² of workshops and two dormitories, specializing in mechanics, electronics, electrical engineering, industrial installation, construction and IT. Students study

for one or three years (plus 3–6-month courses); programs are developed by Korean specialists and are 60–70% practical [15].

Capacity building in new vocational centers: international projects

International projects have strengthened the system, especially in newly established centers:

- “Vocational Education and Training for the Future” (UNDP & EU, 2020–2025), competency-based education, digital skills and private-sector links across seven institutions [16].
- “Strengthening the Vocational Education System of Azerbaijan” (KOICA, 2016–2019), infrastructure, curricula and teacher development, applying Korean experience [17].
- “Support to the Establishment of Advanced VET Centers” (EU, 2020–2024), modernization, digitalization and inclusive education in five regions [18].
- “Strengthening VET in Azerbaijan” (UNESCO, 2018–2021), quality and alignment with international standards [19].
- “Development of VET in Azerbaijan” (GIZ, 2017–2020), modernization and labor market adaptation [20].
- Tourism Education Training Program / Experience Exchange (TIKA, 2022), upskilling tourism professionals and exchange with Turkish institutions [21].

Vocational education and the labor market

Graduate placement and quality were assessed across three factors. Labor market relevance: qualifications target technology, automation, ICT, construction, transport and manufacturing, with strengthening student–graduate–employer integration and significant investment in industrial transformation; interregional links need improvement. International standards: dual and practical models from Korea and Germany are applied in line with OECD, UNESCO and ILO recommendations on learning outcomes, assessment, gender equality and inclusion; wider use of the National Qualifications Framework is still needed. Curriculum and skills: modernized content is 60–70% practical, with micro-qualifications and 3–6-month certification courses supporting flexible entry; teacher-training and mentoring remain areas for improvement.

Global integration of vocational education: SWOT analysis

The integration of Azerbaijan’s vocational education into the global system is summarized in the SWOT analysis below (Table 3).

Table 3

SWOT analysis of the global integration of vocational education in Azerbaijan

Strengths (S)	Weaknesses (W)
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reforms in state policy (e.g. strategic roadmaps for 2020–2025) ✓ Sometimes increasing interest in vocational education ✓ Successful implementation of certain pilot projects (EU, UNESCO, KOICA, GIZ) ✓ Establishment of some modern vocational centers 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lack of widespread implementation of the dual education system ✓ Staff shortage–lack of qualified trainers and teachers ✓ Uneven distribution of infrastructure (lack of it in the regions) ✓ Poor integration with the labor market and limited cooperation with employers
Opportunities (O)	Threats (T)
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Opportunity to learn from successful models of Germany, Korea, Canada ✓ International programs and financial support (Erasmus+, KOICA, EU TVET projects) ✓ Application of digital technologies (online courses, LMS systems) ✓ Increasing demand for new skills in the era of Industry 4.0 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Overall low interest in vocational education and stereotypes about it (disinterested approach of families) ✓ Difficulty in adapting to technological changes ✓ Economic instability and financing problems ✓ Lack of international recognition of certificates

The international importance of vocational education: Indicators and standards

To assess the relevance of vocational education to the international labor market, a conceptual framework drawing on the main international indicators was applied. The WorldSkills competency framework sets internationally agreed standards and assessment criteria across occupational fields [22]; the UNESCO-UNEVOC TVET quality criteria cover labor market relevance, teaching-staff quality, graduate employment and inclusion [23]; the ILO indicators track skills mismatch, re-skilling/upskilling needs and workforce mobility [24]; and the OECD Skills Strategy and CEDEFOP Skills Forecast provide indicators and projections of future skills needs [25–26]. Complementary frameworks include the EQF, ISO 29990, UN SDG 4 and the National Skills Qualifications Framework (NSQF). These indicators, with their methods and tools, are systematized in Table 4.

Table 4

International integration indicators: organizations, purpose, methods and tools

Indicator name	Organization / Source	Purpose of use	Measurement method	Measurement tool
Competency Standards (World Skills)	World Skills International	Assessing the practical skills of graduates	Assessment and expert panel for professional competitions	Practical tasks used in competitions, expert assessment forms, scoring tables
Relevance of Curriculum to the Labor Market (UNESCO-UNEVOC)	UNESCO-UNEVOC	Analyzing the relevance of vocational education to market demands	Curriculum analyses and employer surveys	Curriculum analyses, focus groups with employers, labor market relevance surveys
Graduate Employment Rate (UNESCO-UNEVOC)	UNESCO-UNEVOC	Measuring the relationship between education and employment	Statistical employment indicators, surveys	Graduate employment rates within 6–12 months, official statistics and graduate surveys
Skills Mismatch Index (ILO)	ILO	Detecting the gap between skills supply and demand	Empirical models, survey results	Skills-mismatch indices, labor market surveys, employer and graduate survey results
Reskilling and Upskilling Needs (ILO)	ILO	Assessing the flexibility of education and retraining opportunities	Labor market research and trend analysis	Analysis of areas requiring reskilling, surveys on digital and technological change, frequency of program updates
Transition Rates to Vocational Education (OECD)	OECD – Education at a Glance	Analyzing student flows into TVET	Education statistics and enrolment figures	Enrolment statistics, share of students entering VET, analyses by gender and age group
Student–Teacher Ratio (OECD)	OECD – Education at a Glance	Measuring teaching quality and resource shortages	Statistical analysis and school data	Teaching-load statistics, comparison of teacher and student numbers, school management reports
Future Skills Forecasts (CEDEFOP)	CEDEFOP – Skills Forecast	Forecasting future skills needs	Economic and demographic forecasting models	Modelling of skills needs from economic/technological change, sectoral analyses and forecasting tools

Concluding remarks

This analysis offers an initial, not exhaustive view of the research question. The Korean (TVET and work experience) and German (dual education) models are leading examples but are not readily accessible in the local context. Observations by Azerbaijan Technical University (AzTU) and analysis under the KIEP Visiting Scholar Program indicate that effective integration into the international labor market requires a comprehensive approach: a national skills framework based on global indicators, gradual introduction of the L3 model, stronger industry partnerships and closer cooperation between vocational schools and universities.

Proposed master's-level research directions at AzTU include: a methodological framework for measuring and monitoring VET development against international indicators; comparative analysis of skill requirements in local vs. international labor markets under technological and digital integration; assessment of the employment status of graduates of the pre-2016 system; establishment of a national monitoring platform; and empirical research producing strategic proposals and monitoring mechanisms to assess reform effectiveness.

REFERENCES

1. OECD. OECD Skills Outlook 2025: Building the Skills of the 21st Century for All. Paris, OECD Publishing, 2025. <https://doi.org/10.1787/26163cd3-en>.
2. World Economic Forum. The Future of Jobs Report 2025. Insight Report, January 2025. Geneva, WEF, 2025. <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025/>.
3. World Bank. The Human Capital Project / Human Capital Index (HCI+ 2025). Washington (D.C.), World Bank, 2024–2025. <https://www.worldbank.org/en/publication/human-capital>.
4. Eurostat. Employment rates of recent Graduates-Statistics Explained. Luxembourg, Eurostat, 2024. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Employment_rates_of_recent_graduates.
5. McKinsey & Company. Tech Trends Outlook 2025 / Tech talent insights. New York, McKinsey & Company, 2025. <https://www.mckinsey.com/>.
6. UNESCO Institute for Lifelong Learning. Annual Report 2024; Sixth Global Report on Adult Learning and Education (GRALE 6, forthcoming). Hamburg, UIL, 2024. <https://www.uil.unesco.org/en/grale6>.
7. International Labor Organization. World Employment and Social Outlook: Trends 2025. Geneva, ILO, 2025. <https://www.ilo.org/publications/flagship-reports/world-employment-and-social-outlook-trends-2025>.
8. LinkedIn. 2025 Workplace Learning Report. LinkedIn Learning, 2025. <https://learning.linkedin.com/resources/workplace-learning-report>.
9. State Statistical Committee of the Republic of Azerbaijan; Ministry of Science and Education. Education statistics. Baku, 2024. <https://www.stat.gov.az/source/education/>.
10. Sustainable Development Goals, Azerbaijan. Indicator: youth (15–24) not in employment, education or training. <https://sdg.azstat.gov.az/az/indicators/417/>.
11. Vocational Education Agency under the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan. Official website (agency, institutions, admissions and professions). <https://vet.edu.gov.az>; <https://portal.edu.az>.
12. Strategic Roadmap for the Development of Vocational Education and Training in the Republic of Azerbaijan. Baku, 2016. <https://edu.gov.az/upload/file/serencama-elave/2016/peshe-tehsil-yol-xeritesi.pdf>.
13. State strategic and policy documents on education and employment, incl. State Strategy for the Development of Education (2013), Employment Strategy 2019–2030 (Presidential Decree, 30.10.2018) and Azerbaijan 2030: National Priorities (2021). <https://president.az/az/articles/view/9779>; https://static.president.az/upload/Files/2018/10/30/STRATEG_YA.pdf.
14. Baku State Vocational Education Center for Industry and Innovation. <https://bii.edu.az>; <https://edu.gov.az/az/news-and-updates/16836>; <https://president.az/az/articles/view/34197>; <https://edu.gov.az/az/news-and-updates/14374>.
15. Strategic Development Plan of the Baku State Vocational Education Center for Communications and Information Technologies (2021); Strategic Development Plan of the Jalilabad Vocational Education Center (2019); internal reports of the Ministry of Economy and the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan.
16. UNDP. (2022). Vocational Education and Training for the Future: Support to the Establishment of Advanced Vocational Education Centers in Azerbaijan. United Nations Development Programme. <https://www.undp.org/az/azerbaijan/projects/glck-ucun-pes-thsili-v-tlimi>.
17. KOICA. (2016). Strengthening the Vocational Education System of Azerbaijan. Korea International Cooperation Agency. https://www.koica.go.kr/koica_en/3444/subview.do.
18. UNDP. (2020). EU-funded VET Future project paves the way for innovation and digitalization in vocational education in Azerbaijan. United Nations Development Programme. <https://www.undp.org/azerbaijan/press-releases/eu-funded-vet-future-project-paves-ways-innovation-and-digitalisation-vocational-education-azerbaijan>.

19. UNESCO. (2018). Strengthening Vocational Education and Training in Azerbaijan. UNESCO. <https://en.unesco.org/countries/azerbaijan>.
20. GIZ. (2017). Development of Vocational Education and Training in Azerbaijan. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. <https://www.giz.de/en/worldwide/371.html>.
21. TIKA. (2022). Tourism Education Training Program (TUREP) and Tourism Sector Experience Exchange Program. Turkish Cooperation and Coordination Agency. <https://tika.gov.tr>.
22. World Skills International. (2020). World Skills Competitions. <https://www.worldskills.org>.
23. UNESCO-UNEVOC. TVET Quality Indicators; TVET Quality Assurance: A Global Overview (2016). <https://un-evoc.unesco.org>.
24. International Labor Organization. ILO Skills for Employment portal (<https://www.ilo.org/skills>); ILO (2015) Skills and Jobs: A Global Overview; ILO (2019) The Future of Work. Geneva, ILO.
25. OECD. (2019). OECD Skills Strategy 2019: Skills to Shape the Future. Paris, OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264313831-en>.
26. Cedefop. (2020). Cedefop's work on vocational education and training (VET). <https://www.cedefop.europa.eu/en>.

Accepted: 25.05.2026

SUSTAINABLE DEVELOPMENT STRATEGY OF THE AZERBAIJAN ALUMINIUM INDUSTRY UNDER CBAM

Arzu Jamil Safarli

Azerbaijan Technical University, Azeraluminium LLC, Baku, Azerbaijan
 arzu.safarli@aztu.edu.az, <https://orcid.org/0000-0003-2670-0665>

Abstract. This paper analyses the sustainable development strategy of Azerbaijan's aluminium industry under the EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), entering full force in 2026, using Azeraluminium LLC as the reference unit. A Triple Bottom Line and Circular Economy framework is combined with Slack-Based Measure DEA, eco-efficiency index (EE), and AHP-weighted Composite Sustainability Index (CSI). Five country-level Decision Making Units are benchmarked: Norway, Canada, Russia, China, and Azerbaijan. Results show that Azeraluminium's CO₂ intensity (~6.2 tCO₂-eq/t) and eco-efficiency score ($\theta = 0.62$) expose approximately 20.7% of export revenue to CBAM charges. SBM-DEA slack analysis identifies a 38% CO₂ reduction potential through grid decarbonisation. The aggressive scenario - 400 MW renewable energy plus a 40,000 t/yr secondary aluminium complex - raises the EE index to 0.84 and reduces CBAM exposure to ~13.7%, with an estimated payback of 6-9 years. The scientific novelty is the first comparative SBM-DEA assessment of Azerbaijan's aluminium sector in a global benchmark framework combined with explicit CBAM financial quantification.

Keywords: sustainable development, CBAM, aluminium, eco-efficiency, decarbonization.

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved

INTRODUCTION

Aluminium is indispensable in aerospace, automotive, construction, and energy applications owing to its combination of low density, corrosion resistance, and infinite recyclability. Global primary production reached 72 million tonnes in 2024 - roughly 40% above 2010 levels [1] – yet the sector accounts for approximately 3% of global industrial greenhouse gas emissions. Carbon intensity declined from 16.7 tCO₂-eq/t in 2020 to 14.8 tCO₂-eq/t in 2024, though progress is geographically uneven: Norway operates near 3.7 tCO₂-eq/t while India exceeds 18 tCO₂-eq/t.

The EU's CBAM will require importers to purchase certificates equal to the prevailing ETS carbon price - €60-75/tCO₂ in 2024, with projections above €100/tCO₂ by 2030 [2, pp. 45–60]. Azeraluminium LLC, the only fully integrated aluminium producer in the South Caucasus, produced 63,280 tonnes in 2024 (+72.1% year-on-year) [3]. Because ~90% of Azerbaijan's electricity is generated from natural gas, the company's CO₂ intensity exceeds the international "green aluminium" threshold of ≤4 tCO₂-eq/t, creating a direct CBAM financial exposure. This paper addresses three questions: how does Azeraluminium's eco-economic position compare with global benchmarks; what is the magnitude of the CBAM financial burden under different transformation pathways; and which trajectory optimises the eco-efficiency index within a realistic investment envelope?

THEORETICAL FRAMEWORK AND RESEARCH OBJECTIVES

Triple Bottom Line, Circular Economy and Eco-Efficiency. Triple Bottom Line (TBL) [4, pp. 70–95] frames corporate sustainability across economic, environmental, and social dimensions simultaneously. In metallurgy, these map to per-tonne production value, CO₂-eq emissions, and regional employment respectively. Elkington acknowledged in 2018 that TBL in practice often functions as a reporting tool rather than a driver of systemic change, and that its effectiveness requires integration with Circular Economy thinking. Kirchherr et al. [5] synthesised 114 definitions of the Circular Economy; aluminium is the paradigm material - recycled metal requires only 5-8% of primary production energy, achieving up to 95% emissions reduction [6].

Eco-efficiency was defined by WBCSD [7, pp. 37–38] as the ratio of product value to environmental impact. Korhonen and Luptacik [8] embedded it into DEA models with undesirable outputs, enabling cross-country *ceteris paribus* comparison. Haraldsson and Johansson [9] applied this methodology to aluminium electrolysis, quantifying that a 1 MWh/t reduction in energy intensity corresponds to 0.5-0.7 tCO₂-eq/t lower emissions - a figure directly informing the scenario modelling in this study.

CBAM and Sustainable Development Models. CBAM addresses carbon leakage by applying an ETS-equivalent carbon price to imported goods, combining Pigouvian taxation - internalising external costs - with market-based emission reduction incentives. The Environmental Kuznets Curve hypothesis is contested in aluminium because global trade has demonstrably shifted emissions rather than reduced them. Raworth's Doughnut Economics [10, pp. 38–45] provides a more applicable frame, balancing industrial decisions between a global carbon budget ceiling and a regional social minimum - directly relevant to Azerbaijan's industrial policy context.

METHODOLOGY

Quantitative Methods: MFA, EE Index and SBM-DEA. The study applies a four-stage mixed-methods design. In stage one, Material Flow Analysis [11, pp. 20–45] constructs a gate-to-gate mass balance for Azeraluminium over 2020–2024, encompassing the chain from bauxite input through electrolysis to semi-finished product output. In stage two, the eco-efficiency index follows the WBCSD formula [7, pp. 37–38]: $EE = V_{\text{output}} / (E_{\text{CO}_2} + \alpha \times W_{\text{energy}})$, normalised to [0,1] with Norway as the reference point. In stage three, a Slack-Based Measure DEA model [12] is applied with five Decision Making Units. Inputs are electricity (MWh/t), bauxite/alumina (t/t), and capital intensity (USD/t); desirable outputs are production volume and export value; undesirable outputs are Scope 1+2 CO₂ and water consumption. Norway and Canada define the frontier at $\theta = 1.000$.

Composite Sustainability Index and Scenario Modelling. Stage four constructs a Composite Sustainability Index using AHP weights: eco-efficiency (0.35), CO₂ intensity (0.30), energy intensity (0.20), and social indicator (0.15). Three scenarios are modelled for 2030: a baseline continuing the current energy mix; a moderate scenario adding 200 MW of renewables (reducing grid carbon intensity from ~430 to ~290 g CO₂/kWh); and an aggressive scenario combining 400 MW renewables, a 40,000 t/yr secondary aluminium complex, and waste-heat recovery. Data sources include the State Statistics Committee of Azerbaijan, UNIDO/EU4Environment [13], IAI [1], and annual sustainability reports from Norsk Hydro and Rio Tinto [14].

RESULTS AND DISCUSSION

Eco-Economic Profile of Azeraluminium and Global Benchmarking. Table 1 presents Azeraluminium's sustainability indicators over 2020–2024. The 2023 contraction (36,770 t) reflects a modernisation shutdown; the 72.1% recovery in 2024 marks the activation of expanded capacity. Energy intensity improved from 14.5 to 14.0 MWh/t - yet IAI's best available technology benchmark is 13.0 MWh/t [1], leaving a further 7% potential unrealised. The EE index rose from 0.57 to 0.62, confirming that economic value grew faster than environmental burden over the period. Figure 1 illustrates both trends simultaneously, making the 2023 disruption and subsequent recovery graphically apparent.

Table 1

Key sustainability indicators of Azeraluminium LLC, 2020–2024

Indicator	2020	2022	2023	2024	2025 Q1
Production (t)	~50,000	~52,000	36,770	63,280	15,500
Export (t)	n/a	68,263	74,502	n/a	18,800
Avg. export price (USD/t)	n/a	n/a	n/a	2,448	2,824
Energy intensity (MWh/t) ¹	14.5	14.3	14.2	14.0	n/a
CO ₂ Scope 1+2 (tCO ₂ -eq/t) ²	6.8	6.5	6.4	6.2	n/a
EE index ³	0.57	0.59	0.60	0.62	n/a

¹ Author estimate based on IAI 2024 BAT range (13.2–15.7 MWh/t); n/a - data not available.

² Based on Azerbaijan grid carbon intensity (~430 g CO₂/kWh) and anode process emissions (~1.5 tCO₂-eq/t).

³ WBCSD [7, pp. 37–38] formula; Norway as reference point.

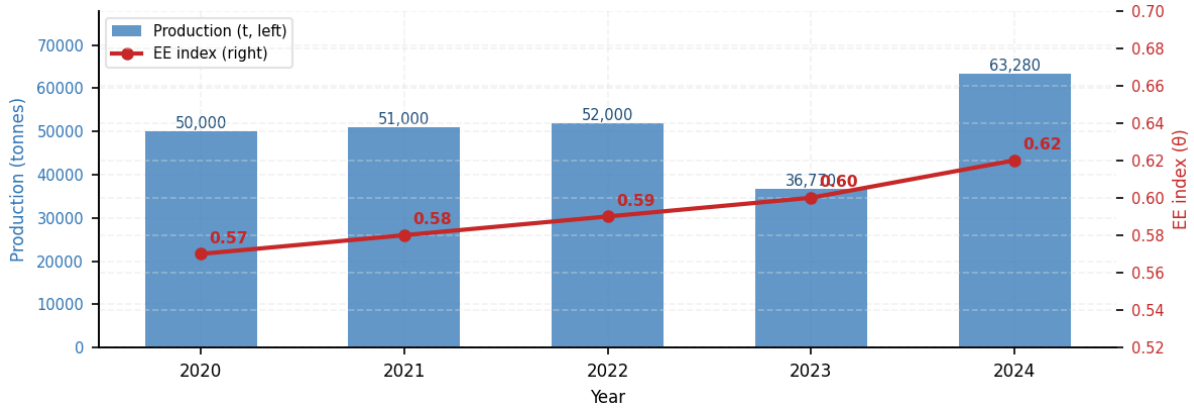


Figure 1. Azeraluminium LLC: production / volume and eco-efficiency index dynamics (2020-2024)

Table 2 shows the SBM-DEA comparative profile. Norway and Canada sit on the efficiency frontier ($\theta = 1.000$) through near-total reliance on hydropower. Azerbaijan ranks fourth at 0.62. China scores lowest (0.41) because despite relatively lean energy intensity its coal mix drives massive undesirable CO₂ output. Figure 2 plots these CO₂ intensity positions along a single axis, with the green aluminium threshold at 4 tCO₂-eq/t as a visual reference. Three strategic implications follow: Azerbaijan's energy intensity matches the world average, confirming competent process management; its CO₂ intensity (6.2 tCO₂-eq/t) is less than half the world average but remains well above hydropower leaders; and Rusal's ALLOW line (5.9 tCO₂-eq/t) is virtually identical to Azerbaijan's - both occupy the CBAM "middle-carbon" band [14].

Table 2

Comparative SBM-DEA sustainability profile of leading aluminium producers (2024)

Country / Producer	Output (Mt)	CO ₂ (t/t)	Energy (MWh/t)	θ (DEA)	Dominant energy source
Norway (Hydro)	1.3	3.7	13.0-14.0	1.000	Hydropower ~100%
Canada (Rio Tinto)	3.3	<2.4	14.0-14.5	1.000	Hydropower ~100%
Russia (Rusal ALLOW)	3.8	5.9	14.5	0.89	Hydropower >90%
Azerbaijan	0.063	6.2	14.0	0.62	Natural gas ~90%
China (average)	43.0	16-20	13.4	0.41	Coal ~57%
World average	72.0	14.8	14.1	-	Coal 56.9% / hydro 31.3%

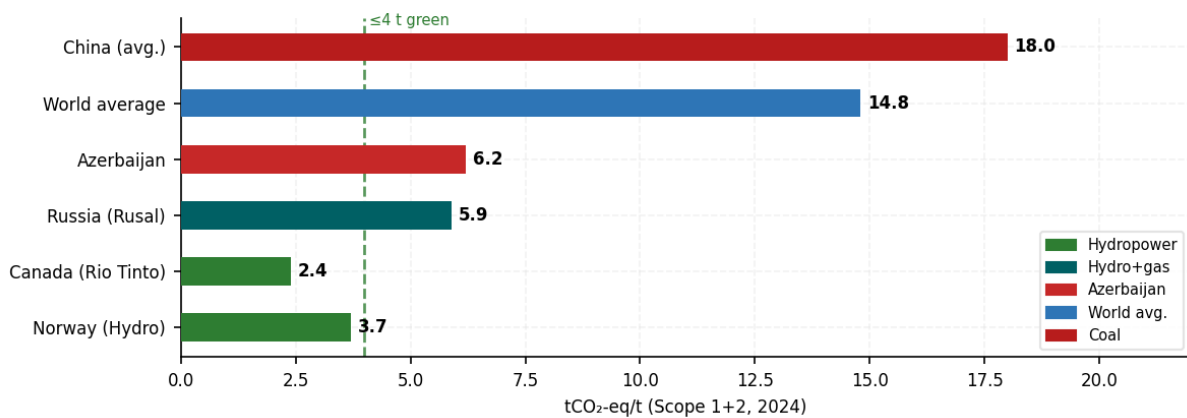


Figure 2. Global CO₂ intensity comparison by country and producer (tCO₂-eq/t, 2024)

Table 3 and Figure 3 present the AHP-weighted CSI results. Azerbaijan's CSI of 0.74 meaningfully exceeds its DEA θ of 0.62, reflecting the company's regional employment contribution - the social dimension partially compensates for the CO₂ intensity deficit visible in the radar chart.

Table 3

Composite Sustainability Index with AHP weights

Criterion	AHP weight	Norway	Canada	Azerbaijan	China
Eco-efficiency (DEA θ)	0.35	1.00	1.00	0.62	0.41
CO ₂ intensity	0.30	0.96	0.99	0.79	0.27
Energy intensity	0.20	0.88	0.85	0.86	0.87
Social indicator	0.15	0.85	0.88	0.72	0.68
CSI (composite)	-	0.94	0.95	0.74	0.52

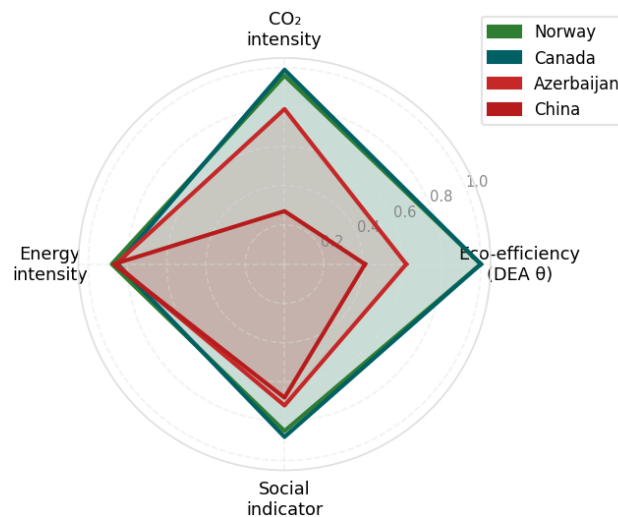


Figure 3. Composite Sustainability Index radar chart across four criteria (2024)

CBAM Financial Impact and Strategic Outlook. Table 4 and Figure 4 quantify the CBAM exposure under each scenario. At current CO₂ intensity (6.2 tCO₂-eq/t) and an ETS price of €75/tCO₂, the CBAM charge reaches ~€465/t - approximately 20.7% of the 2024 average export price of USD 2,448/t [3]. The aggressive scenario reduces CO₂ intensity to 4.1 tCO₂-eq/t and CBAM exposure to ~13.7% of export price. The required capital investment of USD 350-500 million [14] generates annual CO₂ reductions of ~340,000 t plus a market premium of USD 50-100/t from European buyers for approaching the "green aluminium" threshold; on this basis the payback period is estimated at 6-9 years.

Table 4

CBAM financial burden across scenarios: current and 2030 projections

Indicator	Current (2024)	Baseline (2030)	Moderate (2030)	Aggressive (2030)
Renewable energy addition	0 MW	0 MW	200 MW	400 MW
EE index (θ)	0.62	0.65	0.74	0.84
CO ₂ intensity (tCO ₂ -eq/t)	6.2	6.0	4.8	4.1
Annual CO ₂ reduction (kt)	-	~13	~180	~340
CBAM charge (EUR/t)	~465	~450	~360	~308
Share of export price (%)	~20.7	~20.0	~16.0	~13.7

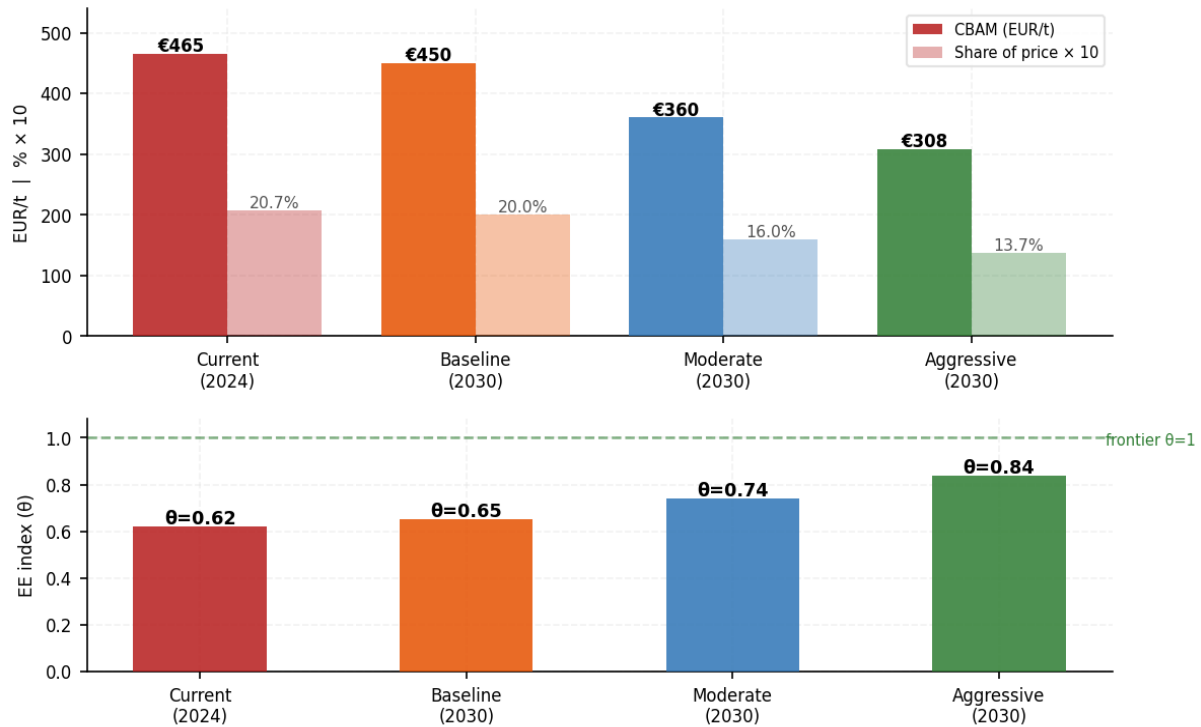


Figure 4. CBAM financial burden and EE index across scenarios (2024-2030)

CBAM's displacement of high-carbon Chinese production from EU markets creates an asymmetric opportunity for Azerbaijan: as a middle-tier producer, it is better positioned than coal-based competitors to capture market share - but only if the carbon profile improves sufficiently. UNIDO/EU4Environment [13] documents that Azeraluminium has already begun concrete planning in this direction, and the alignment between renewable energy investment and Azerbaijan's broader energy diversification agenda strengthens the policy case further [15].

CONCLUSION

Three principal findings emerge. First, Azeraluminium's CO₂ intensity (~6.2 tCO₂-eq/t) and eco-efficiency score ($\theta = 0.62$) place it in a global middle tier that faces a CBAM charge equivalent to ~20.7% of export revenue from 2026. Second, SBM-DEA slack analysis reveals a 38% CO₂ reduction potential realisable through grid decarbonisation alone, without changes to production volume or process technology. Third, the aggressive scenario raises the EE index to 0.84, reduces CBAM exposure to ~13.7% of export price, and yields an estimated payback of 6-9 years.

Policy recommendations are: (i) integrate 400 MW of renewable energy by 2028; (ii) pursue ASI Performance Standard certification to access the green aluminium price premium in European markets; and (iii) build a "low-carbon Caspian aluminium" brand for Turkish, EU, and Japanese buyers. **Limitations** arise from restricted public access to plant-level data, requiring estimation of some indicators from international benchmarks. **Future research** should conduct plant-specific Life Cycle Assessment and integrate 2030 ETS price forecasts into the CBAM financial model. In sum, the sustainable development of Azerbaijan's aluminium industry is not an environmental aspiration but a near-term competitive imperative.

REFERENCES

1. International Aluminium Institute. Primary aluminium greenhouse gas emissions intensity 2024 update. <https://international-aluminium.org>
2. European Commission JRC (Zore L.). Decarbonisation options for the European aluminium industry. EUR 31925 EN. Publications Office of the European Union, 2024, 87 p.

3. Alcircle. Azerbaijan's aluminium output grows 5.8% in Q1 2025. <https://www.alcircle.com>, 2025.
4. Elkington J. Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. New Society Publishers, 1998, 402 p.
5. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, vol. 127, pp. 221–232.
6. Liu G., Müller D.B. Addressing sustainability in the aluminum industry: A critical review of life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, 2012, vol. 35, pp. 108–117.
7. WBCSD (Schmidheiny S.). Changing course: A global business perspective on development and the environment. MIT Press, 1992, 374 p.
8. Korhonen P.J., Luptacik M. Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of DEA. *European Journal of Operational Research*, 2004, vol. 154, no. 2, pp. 437–446.
9. Haraldsson J., Johansson M.T. Effects on primary energy use and greenhouse gas emissions from improving energy end-use efficiency in aluminium electrolysis. *Energy Efficiency*, 2020, vol. 13, no. 7, pp. 1299–1318.
10. Raworth K. Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st-century economist. Chelsea Green Publishing, 2017, 309 p.
11. Brunner P.H., Rechberger H. Handbook of material flow analysis (2nd ed.). CRC Press, 2016, 388 p.
12. Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, vol. 130, no. 3, pp. 498–509.
13. UNIDO / EU4Environment. Azeraluminium LLC: Resource-efficient and cleaner production demonstration project. Brussels / Baku, 2024.
14. Wang Y., Wen Z., Cao X., Zheng Z., Xu J. Environmental efficiency evaluation of China's iron and steel industry: A process-level DEA. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 707, 135903.
15. World Economic Forum. Net-zero industry tracker 2024 - Aluminium. <https://reports.weforum.org>, 2024.

Accepted: 14.05.2026

DAVRANIŞ İQTİSADİYYATI VƏ QƏRAR QƏBULETMƏ: KOQNİTİV QƏRƏZLƏR, EVRİSTİKA VƏ SİYASƏT NƏTİCƏLƏRİ

Ceyhun Gülməmməd oğlu Hacıyev, Ziya Rafiq oğlu İsgəndərov,
Sənan Taleh oğlu Məmmədov

Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan

BEHAVIORAL ECONOMICS AND DECISION-MAKING: COGNITIVE BIASES, HEURISTICS, AND POLICY IMPLICATIONS

Jeyhun Gulmammad Hajiyev, Ziya Rafiq Isgandarov, Sanan Taleh Mammadov

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

ceyhun.hajiyev@aztu.edu.az, ziyaisgandar@gmail.com, senan.mememdov@aztu.edu.az

https://orcid.org/0000-0003-4240-7514

Abstract. The rise of behavioral economics as a leading discipline has fundamentally challenged the classical rational choice framework that underpinned economic analysis for over two centuries. By integrating insights from cognitive psychology and social psychology into economic modelling, behavioral economics offers a richer, empirically grounded account of how individuals, firms, and entrepreneurs actually make decisions under uncertainty, bounded rationality, and emotional influence. This article synthesizes theoretical and empirical literature to examine how cognitive biases, heuristics, emotional states, and contextual factors shape economic behavior. Drawing on prospect theory, bounded rationality, nudge theory, and a recent systematic review on entrepreneurial decision-making, the article argues that deviations from rationality are not random errors but predictable, systematic patterns. The article also identifies persistent gaps in the literature, particularly the under-representation of emerging economy contexts, the artificial separation of cognitive and emotional dimensions, and the need for longitudinal research designs. A call is made for a more integrative, context-sensitive framework that reconciles adaptive expertise with bounded rationality.

Keywords: *behavioral economics, decision-making, cognitive biases, heuristics, nudge theory, prospect theory.*

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

1. Giriş

Klassik iqtisadi nəzəriyyə əldəçatıcı dərəcədə zərif bir fərziyyə üzərində qurulmuşdur: fərqlər tam məlumat, limitsiz koqnitiv güc və ardıcıl üstünlüklərə malik olan rəsonal agentlərdir. Homo economicus adlanan bu model, onilliklər boyunca nəzəri iqtisadiyyatın əsasını təşkil etmiş, istehlakçı nəzəriyyəsinə oyun nəzəriyyəsinə qədər güclü analitik alətlər yaratmışdır. Lakin həqiqi insanlar rəsonal seçim nəzəriyyəsinin proqnozlarından sistemli, proqnozlaşdırıla bilən şəkillərdə kənara çıxırlar.

Davranış iqtisadiyyatı bu empirik adekvatsızlığa cavab olaraq meydana gəldi. Koqnitiv psixologiya, sosial psixologiya və neyrologiyadan anlayışları sintez edərək, iqtisadi qərar qəbuletmənin alternativ hesabını qurmağa çalışdı. Hərəkət, Herbert Simon, Daniel Kahneman, Amos Tversky və Richard Thaler'in fundamental töhfələrindən sonra əhəmiyyətli sürət qazandı.

Alrohaem, Gallage və İslam [1] davranış iqtisadiyyatının sahibkarlıq qərar qəbuletməsinə artan tətbiqini sənədləşdirərək, həddindən artıq özgüvən və zərərdən qaçınma kimi koqnitiv qərəzlərin müəssisə yaradılmasını, fürsət tanınmasını və strateji seçimi necə sisteməlik şəkildə formalaşdırdığını müəyyən etdi.

Bu məqalə bir neçə əsas bölmədə qurulmuşdur. İlk olaraq rəsonal seçim nəzəriyyəsinə qarşı irəli sürülən nəzəri etirazlar – məhdud rəsonallıq, perspektiv nəzəriyyəsi və ikili proses modeli – nəzərdən keçirilir. Sonra ən geniş sənədləşdirilmiş koqnitiv qərəzlərin iqtisadi nəticələri təhlil edilir. Daha sonra emosiyaların, sosial normaların və institusional kontekstin rolu araşdırılır, ardınca işarə vermə nəzəriyyəsinə əsaslanan siyasət tətbiqləri müzakirə olunur. Nəhayət, mövcud ədəbiyyatdakı metodoloji və kontekstual boşluqlar müəyyən edilərək gələcək tədqiqat istiqamətləri təklif edilir. Belə bir struktur, davranış iqtisadiyyatının nəzəri köklərindən praktiki siyasət nəticələrinə qədər ardıcıl bir keçid təmin etmək məqsədi daşıyır.

2. Nəzəri əsaslar

2.1. Rasional seçim nəzəriyyəsinə meydan oxuma

Rasional seçim modeli, agentlərin sabit, yaxşı sıralanmış üstünlüklərə malik olduğunu və mümkün nəticələr üzərindən gözlənilən faydanı hesablayaraq qərar verdiyini fərz edir. Onun intellektual irsi Bentham'ın utilitarizmindən von Neumann–Morgenstern (1944) aksiomatik çərçivəsinə qədər uzanır. Bu əsnədə rasional davranışdan kənara çıxmalar sistematik koqnitiv xüsusiyyətlər deyil, istisnalar kimi qəbul edilirdi.

Gözlənilən fayda nəzəriyyəsinin aksiomatik əsasları – tamlıq, tranzitivlik, müstəqillik və davamlılıq – formal baxımdan zərif olsa da, empirik müşahidələr bu aksiomların müntəzəm şəkildə pozulduğunu göstərmişdir. Allais paradoksu və oxşar eksperimentlər müstəqillik aksiomunun real qərar qəbuletmədə davamlı şəkildə pozulduğunu nümayiş etdirdi. Bu cür sistematik anomaliyaların toplanması, davranış iqtisadiyyatının yalnız klassik modelə əlavə deyil, onun fundamental fərziyyələrinin yenidən nəzərdən keçirilməsi kimi formalaşmasına səbəb oldu.

İlk davamlı nəzəri meydan oxuma məhdud rasionallıq anlayışını təqdim edən Herbert Simon'dan gəldi [2]. Simon, qərar qəbul edənlərin məhdud məlumat, kəsilməmiş koqnitiv güc və zaman təzyiqi kimi sistemli məhdudiyyətlərlə üzləşdiyini iddia etdi. Maksimallaşdırmaq əvəzinə, agentlər qənaətbəxş bir hədd daxilindəki ilk mövcud seçimi seçirlər. Bu anlayış, sualı agentlərin necə qərar verməli olduğundan əslində necə qərar verdiklərindən keçirdi [1].

Maraqlıdır ki, Simon'un məhdud rasionallıq anlayışı rasionallığı tamamilə rədd etmir; əksinə, onu insan idrakının real koqnitiv və informasiya məhdudiyyətləri ilə uzlaşdırır. Qənaətbəxşləşdirmə strategiyası, hesablama xərclərinin yüksək, vaxtın isə məhdud olduğu mühitlərdə tez-tez optimal nəticəyə yaxın həllər təqdim edir. Bu baxımdan davranış iqtisadiyyatı klassik nəzəriyyəni tamamilə ləğv etmir, onun tətbiq sərhədlərini daha dəqiq müəyyənləşdirir. Beləliklə, məhdud rasionallıq rasional seçim modelinə alternativ deyil, daha çox onun psixoloji baxımdan reallaşdırıla bilən versiyası kimi qəbul edilməlidir.

2.2. Perspektiv nəzəriyyəsi və zərərdən qaçınma

Gözlənilən fayda nəzəriyyəsinə ən təsirli alternativ Kahneman və Tversky tərəfindən hazırlanan perspektiv nəzəriyyəsidir [3]. Nəzəriyyə üç əsas istiqamətdə rasional seçim çərçivəsindən kənara çıxır: fərdlər nəticələri mütləq deyil, bir istinad nöqtəsinə görə qiymətləndirir; subyektiv dəyər funksiyası asimmetrikdir – zərərlər ekvivalent qazanclardan təxminən iki dəfə daha ağır çəkiyə malikdir [3]; fərdlər kiçik ehtimalları həddindən artıq, böyük olanları isə az çəkiyə salır.

Sahibkarlıq kontekstlərindəki zərərdən qaçınma niyə sahibkarların çox vaxt uğursuz müəssisələrlə davam etdiyini izah edir: zərəri qəbul etməyin psixoloji dəyəri, erkən çıxışdan gözlənilən faydasından daha böyükdür [1].

Perspektiv nəzəriyyəsinə irəli gələn sahiblik effekti fərdlərin artıq malik olduqları aktivlərə, onları əldə etmək üçün ödəməyə hazır olduqlarından daha yüksək dəyər biçməsinə izah edir. Eyni məntiqlə status-kvo qərəzi qərar qəbul edənləri mövcud vəziyyəti saxlamağa meyilli edir, çünki dəyişiklikdən doğacaq potensial zərər, eyni ölçülü potensial qazancıdan psixoloji baxımdan daha güclü hiss olunur. Bu mexanizmlər istehlakçı davranışından investisiya portfelinin idarə edilməsinə qədər geniş spektrdə müşahidə olunur və qiymət müəyyənləşdirilməsi, müqavilə dizaynı və bazar likvidliyi üçün mühüm nəticələrə malikdir [3].

Perspektiv nəzəriyyəsi ilə sıx bağlı olan zehni mühasibatlıq anlayışı fərdlərin pulu mənbəyinə, məqsədinə və zaman çərçivəsinə görə ayrı-ayrı zehni hesablara bölməsini izah edir. Klassik nəzəriyyəyə görə pul mübadilə oluna bilən vahid resursdur; lakin real davranışda eyni məbləğ fərqli hesablara aid edildikdə tamamilə fərqli şəkildə xərclənir. Bu, niyə insanların eyni vaxtda həm yüksək faizli borc daşıyıb, həm də aşağı gəlirli əmanət saxladığını izah edir və büdcə tərtibi ilə bağlı qərarların rasional optimallaşdırma modelindən kənara çıxdığını göstərir [3].

2.3. İkili proses nəzəriyyəsi

Kahneman [4, pp. 19-30] Sistem 1 (avtomatik, sürətli, assosiativ) və Sistem 2 (yavaş, deliberat, analitik) arasındakı fərqi ən əlçatan şəkildə ifadə etmişdir. Gündəlik iqtisadi qərarların böyük əksəriyyəti Sistem 1 vasitəsilə işlənir – tanış kontekstlərdə effektiv olsa da, mürəkkəb vəziyyətlərə tətbiq edildikdə sistemə qəzəzlərə meyillidir.

Alrohaeem et al. [1] sahibkarlıqda erkən mərhələ qərarlarının çox vaxt Sistem 1 tərəfindən idarə edildiyini, lakin təcrübəli sahibkarların sahəyə xas adaptiv evristika inkişaf etdirdiyini qeyd edir.

İkili proses çərçivəsinin əhəmiyyətli nəticəsi ondan ibarətdir ki, koqnitiv qəzəzlər ümumiyyətlə Sistem 2-nin Sistem 1-in avtomatik təkliflərini kifayət qədər nəzarətdən keçirə bilmədiyi hallarda ortaya çıxır. Koqnitiv yük, vaxt təzyiqi və emosional gərginlik Sistem 2-nin müdaxiləsini zəiflədərək sistemə səhvlərin ehtimalını artırır [4, pp. 19-30]. Buna görə də qərar mühitinin sadələşdirilməsi və düşünmə üçün əlavə vaxtın təmin edilməsi bir çox halda qəzəzlərin təsirini azaldır. Bu müşahidə, sonrakı bölmələrdə müzakirə edilən işarə vermə müdaxilələrinin nəzəri əsasını təşkil edir.

3. Koqnitiv qəzəzlər və onların iqtisadi nəticələri

3.1. Həddindən artıq özgüvən

Həddindən artıq özgüvən – öz mühakimələrinin dəqiqliyini həddən artıq qiymətləndirmək meyli – iqtisadi davranışda ən yaxşı sənədləşdirilmiş koqnitiv qəzəzlərdən biridir. Qlobal iş uğursuzluq nisbətlərinin 70 faizi keçməsinə baxmayaraq, sahibkarlar inanılmaz nikbinliklə bazarlara girməyə davam edirlər [1]. Bununla belə, ədəbiyyat bu qəzəzin nüanslı mənzərəsini ortaya qoyur: həddindən artıq özgüvən həddən artıq qeyri-müəyyənlik şəraitlərindəki sahibkarlıq fəaliyyətini asanlaşdırır. Qəzəz ilk növbədə müəssisənin sonrakı inkişaf mərhələlərindəki fəaliyyət zamanı problemli olur [1].

Həddindən artıq özgüvən ən azı üç fərqli formada təzahür edir: öz biliyinin dəqiqliyinin həddən artıq qiymətləndirilməsi, öz qabiliyyətinin başqaları ilə müqayisədə şişirdilməsi və gələcək nəticələr barədə əsassız nikbinlik. Maliyyə bazarlarında bu qəzəz həddindən artıq ticarətə, diversifikasiyanın azalmasına və qiymət köpüklərinin formalaşmasına töhfə verir. Sahibkarlıq kontekstində isə eyni qəzəz innovasiya və riskə hazırlığı qidalandırdığı üçün ikili xarakter daşıyır – bu da qəzəzlərin universal olaraq zərərli kimi qiymətləndirilməsinin yanlış olduğunu göstərir [1].

3.2. Mövcudluq və nümayəndəlik evristikası

Tversky və Kahneman [5] qeyri-müəyyənlik şəraitindəki mühakiməni sadələşdirən koqnitiv qısayollar – evristika – müəyyən etdi. Gigerenzer və Gaissmaier [9] göstərmişdir ki, evristik qərar qəbuletmə yalnız qüsur analizi deyil, çox vaxt mühitə uyğunlaşdırılmış, ekoloji cəhətdən rəşional bir strategiyadır. Mövcudluq evristikası, fərdlərə statistik tezlik əvəzinə nümunələrin ağıla gəlmə rahatlığına görə ehtimalı qiymətləndirməyə sövq edir.

Mövcudluq evristikasının iqtisadi nəticələri geniş yayılmışdır: investolar son zamanlarda media diqqətini cəlb etmiş hadisələrin ehtimalını şişirdə, sığorta alıcıları isə yaxınlarda baş vermiş fəlakətlərə əsaslanaraq qərar verə bilər. Bu, bazar qiymətlərinin fundamental dəyərdən sistemə şəkildə uzaqlaşmasına səbəb ola bilər. Eyni zamanda, həmin evristika sürətli reaksiya tələb edən vəziyyətlərdə dəyərli ola bilər, çünki o, qərar prosesini idarəolunan informasiya həcminə endirir [5].

Nümayəndəlik evristikası isə fərdləri bənzərliyə görə kateqoriya üzvlüyünü qiymətləndirməyə sövq edir, çox vaxt nümunə ölçüsünü nəzərə almayaraq. Sahəyə xas ekspertizaya malik sahibkarlar bu evristikanı daha dəqiq tətbiq edə bilər [1] – bu, həmin mexanizmin mahiyyəti etibarilə qüsur olmadığını, lakin fəaliyyətinin əvvəlki biliklərin keyfiyyətindən asılı olduğunu göstərir.

Ekoloji rəşionalıq perspektivi evristikaları sadəcə qənaətbəxş kompromislər kimi deyil, müəyyən mühit strukturlarına uyğunlaşdırılmış güclü alətlər kimi qiymətləndirir [9]. Məsələn, tanınma evristikası məlumatın natamam olduğu şəraitlərdə bəzən mürəkkəb hesablaşma modellərindən daha dəqiq proqnozlar verir. Bu, qərar keyfiyyətinin yalnız istifadə olunan strategiyadan deyil, həm də həmin strategiyanın tətbiq edildiyi informasiya mühitindən asılı olduğunu göstərir. Beləliklə,

evristik mühakimənin qiymətləndirilməsi mücərrəd norma deyil, kontekstual uyğunluq meyarı tələb edir.

3.3. Lövbər salma və çərçivəçilik effektləri

Lövbər salma fərdlərin qarşılaşdıqları ilk məlumat parçasına qeyri-mütənasib etibar etmə meylini ifadə edir. Çərçivəçilik effektləri sıx bağlıdır: eyni məlumatın müxtəlif şəkildə təqdim edilməsi fərqli seçimlər yaradır.

Lövbər effekti bazarlıq, qiymətqoyma və hüquqi qərarlar kimi sahələrdə güclü təsir göstərir; ilkin təklif edilən rəqəm sonrakı razılaşmanın istinad nöqtəsinə çevrilir. Çərçivəçilik isə eyni iqtisadi nəticənin qazanc və ya itki kimi təqdim edilməsindən asılı olaraq fərqli reaksiyalar doğurur – sağlamlıq, sığorta və ictimai siyasət sahələrində bu effekt davranışı ciddi şəkildə dəyişə bilər. Bu effektlərin geniş kontekstlərdə təkrarlanması və davamlılığı onların təsadüfi səhvlər deyil, idrakın struktur xüsusiyyətləri olduğunu təsdiqləyir [5].

4. Emosiya, sosial təsir və kontekstual amillər

4.1. Emosiyaların rolu

Davranış iqtisadiyyatı emosiyaları aradan qaldırılmalı irrasionalıq mənbəyi kimi deyil, kontekstdən asılı olaraq mühakiməni həm inkişaf etdirə, həm də pisləşdirə bilən qərar qəbuletmə prosesinin ayrılmaz komponenti kimi konseptualizasiya etdi. Sahibkarlıq ehtirasının fürsət tanınmasını artırdığı, qorxu və stresin isə ya müəssisənin həyatiliyini qoruyan riskdən qaçınmanı həvəsləndirə, ya da zəruri qərarlardan qaçınmağa səbəb ola biləcəyi göstərilmişdir [1].

Emosiyaların qərara təsiri iki kanaldan keçir: qərar anında yaşanan ani emosiyalar və gözlənilən gələcək emosiyalar. Peşmançılıqdan qaçınma kimi gözlənilən emosiyalar fərdləri daha az riskli, lakin bəzən daha az səmərəli seçimlərə yönəldə bilər. Affektiv vəziyyətlər həmçinin diqqəti və yaddaşı seçici şəkildə formalaşdıraraq hansı məlumatların qərar prosesinə daxil olduğunu müəyyənləşdirir. Bu səbəbdən emosiyaların koqnitiv proseslərdən süni şəkildə ayrılması iqtisadi davranışın natamam təsvirinə gətirib çıxarır [1].

Neyroiqtisadiyyat sahəsindəki tədqiqatlar emosiya və idrakın qərar prosesində fiziki olaraq bir-birinə bağlı olduğunu göstərir; risk və mükafatın qiymətləndirilməsi həm analitik, həm də affektiv beyin sistemlərinin birgə iştirakını tələb edir. Bu tapıntılar emosiyanı rasionallığa zidd bir maneə kimi deyil, adaptiv qərar qəbuletmənin tərkib hissəsi kimi qəbul etməyə əsas verir. Tamamilə emosiyasız qərar qəbuletmənin mümkün olduğu hallarda belə, çox vaxt zəif və qətiyyətsiz seçimlərə gətirib çıxardığı müşahidə edilmişdir, bu da affektin qərar prosesindəki funksional rolunu vurğulayır.

4.2. Sosial normalar və kontekstual amillər

Klassik iqtisadiyyat üstünlükləri sosial kontekstdən müstəqil kimi qəbul edir. Davranış iqtisadiyyatı isə üstünlüklərin həmyaşdlar, icmalar və mədəni istinad qrupları ilə qarşılıqlı əlaqə vasitəsilə formalaşdığını nümayiş etdirir. Yüksək kollektivizmli cəmiyyətlərdə sosial təsdiq, sahibkarlıq fəaliyyətinin əsas motivasiyası və ya məhdudlaşdırıcı amili kimi xidmət edə bilər [1].

Davranış qərəzlərinin özünü göstərməsi güclü şəkildə institusional kontekstdən asılıdır. Alrohaeem et al. [1] inkişaf etməkdə olan iqtisadiyyatlarda risk qavrayışı və zərərdən qaçınmanın formal institutların işlədiyi inkişaf etmiş iqtisadiyyatlarla müqayisədə xeyli fərqli olduğunu ortaya qoyur. Davranış tədqiqatlarının küllü miqdarının WEIRD əhalidən keçirilməsi, nəticələrin ümumiləşdirilə bilirliliyi barədə ciddi suallar yaradır.

Sosial müqayisə və konformizm mexanizmləri istehlak normalarından əmanət davranışına qədər müşahidə olunur. İnsanlar tez-tez öz seçimlərini referens qrupun davranışına uyğunlaşdırır ki, bu da sosial sübut effekti adlanır. İnkişaf etməkdə olan iqtisadiyyatlarda qeyri-formal şəbəkələrin və ailə strukturlarının güclü rolu, qərəzlərin təzahür formasını inkişaf etmiş bazarlardan fərqli edir və universal davranış modellərinin birbaşa tətbiqini çətinləşdirir [1]. Bu, davranış prinsiplərinin mədəni və institusional kontekstə həssas şəkildə öyrənilməsinin zəruriliyini bir daha vurğulayır.

5. Siyasət nəticələri: işarə vermə nəzəriyyəsi

Thaler və Sunstein [6, pp. 3-14] tərəfindən işlənib hazırlanan işarə vermə nəzəriyyəsi, siyasətçilərin seçim azadlığını dəyişdirmədən fərdləri daha yaxşı seçimlərə yönəltmək üçün seçim mühitini yenidən strukturlaşdırma biləcəyini təklif etdi. Pensiya əmanətlərindəki standart qeydiyyat, sadələşdirilmiş vergi formaları, kafeteryalarda sağlam seçimlərin ön cərgəyə qoyulması klassik nümunələrdir. Alrohaem et al. [1] işarə vermənin yüksək riskli mühitlərdə qərar iflic olmasını azaldabiləcəyini qeyd etsə də, effektivliyin hədəflənən koqnitiv prosesə görə dəyişdiyini vurğulayır.

İşarə vermə alətləri son onilliklərdə dünyanın bir sıra ölkələrində ictimai siyasətin formal hissəsinə çevrilmişdir. Pensiya planlarına avtomatik qeydiyyat, orqan donorluğunda standart razılıq sxemləri və enerji istehlakının sosial müqayisə əsasında bildirilməsi davranış prinsiplərinin praktiki tətbiqinin tanınmış nümunələridir. Lakin bu müdaxilələrin təsiri kontekstdən asılı olaraq əhəmiyyətli dərəcədə dəyişir və bəzi hallarda tamamilə zəifləyir. Bu səbəbdən işarə vermənin universal həll kimi deyil, konkret mühit və hədəf qrupu üçün diqqətlə kalibrələnən bir alət kimi qəbul edilməsi tövsiyə olunur [1].

Pul stimullarının tətbiqi əvvəllər pro-ətraf mühit davranışını dəstəkləyən intrinsik motivasiyaları paradoksal olaraq zəiflədə bilər. Frey və Jegen [7] tərəfindən müəyyən edilən bu motivasiya sıxışdırma effekti, mühafizə ödəmə proqramlarının dizaynı üçün dərin nəticələrə malikdir: diqqətsizliklə tətbiq edilən stimullar uzunmüddətli davamlılığın əsasını aşındıra bilər.

İşarə vermənin effektivliyi onun hədəflədiyi koqnitiv mexanizmlə uyğunluğundan asılıdır. Standart variantın dəyişdirilməsi ətalət və status-kvo qərəzindən istifadə edərək davranışı az səylə dəyişdirir, halbuki yalnız məlumatlandırmaya əsaslanan müdaxilələr çox vaxt daha zəif təsir göstərir. Bununla yanaşı, etik mülahizələr işarə vermənin şəffaflığını və fərdin avtonomiyasına hörməti tələb edir; gizli manipulyasiya ilə leqitim yönləndirmə arasındakı sərhəd siyasət dizaynında mərkəzi məsələdir [6, pp. 3-14]. Buna görə də işarə vermə alətləri tətbiq edilməzdən əvvəl ciddi empirik sınaqdan keçirilməli və onların qeyri-bərabər təsirləri qiymətləndirilməlidir.

6. Ədəbiyyatdakı boşluqlar və gələcək tədqiqat istiqamətləri

Davranış iqtisadiyyatı tədqiqatlarının davamlı məhdudiyyəti real dünya şərtlərini ala bilməyən laboratoriya eksperimentlərinə həddən artıq güvənmədir. Koqnitiv proseslərin özünə bildiriş ölçüləri, yenidən çağırma qərəzinə həssasdır. Koqnitiv və emosional dəyişənlərin süni ayrılığı – sahibkarlıq tədqiqatlarının 94 faizindəki müstəqil amillər kimi qəbul edilir [1] – parçalanmış hesablar yaradır.

Qərb perspektivlərinin üstünlüyü nəzəri ümumiləşdirilə bilirlilik üçün əhəmiyyətli məhdudiyyəti təmsil edir: davranış tədqiqatlarının 82 faizi Qərb kontekstlərindən gəlir [1]. Mokyr [10, pp. 1-15] texnoloji yaradıcılığın institusional kontekstdən asılılığını vurğulayır ki, bu da davranış prinsiplərinin fərqli iqtisadi mühitlərdə necə özünü göstərdiyinin öyrənilməsinin mühümlüyünü təsdiq edir.

Mövcud tədqiqatların əksəriyyəti kəşimə məlumatlarına əsaslanır ki, bu da davranış nümunələrinin zamanla necə dəyişdiyini izləməyə imkan vermir. Boylama tədqiqat dizaynları sahibkarların təcrübə topladıqca adaptiv evristika inkişaf etdirib-ətdirmədiyini, yoxsa eyni qərəzləri təkrarladığını aydınlaşdırma bilər. Eyni zamanda, davranış prinsiplərinin mədəni və institusional baxımdan müxtəlif kontekstlərdə təkrar yoxlanması sahənin etibarlılığı üçün zəruridir [1]. Metod çoxnövçülüüyü – eksperiment, sahə müşahidəsi və böyük həcmli rəqəmsal davranış məlumatlarının birləşdirilməsi – gələcək tədqiqatların etibarlılığını artırma bilər.

Digər mühüm boşluq isə davranış prinsiplərinin nəzəri inteqrasiyasının zəifliyidir. Hazırda ədəbiyyat bir-birindən nisbətən təcrid olunmuş qərəz və evristikaların siyahısı şəklində inkişaf etmişdir; lakin bu mexanizmlərin bir-biri ilə necə qarşılıqlı təsir göstərdiyi və hansı şəraitdə hansının üstünlük təşkil etdiyi az öyrənilmişdir. Vahid nəzəri çərçivənin formalaşdırılması – koqnitiv, emosional və sosial amilləri eyni modeldə birləşdirən – sahənin yetkinləşməsi üçün başlıca vəzifələrdən biridir [1].

Fundamental nəzəri gərginlik – koqnitiv qısayolların rasiona emal boşluğunu yoxsa adaptiv cavabı təmsil etdiyi – davranış iqtisadiyyatında davam edir. Alrohaem et al. [1] məhdud rasionallıq

və uyğunlaşdırıcı ekspertizanın rəqabətli deyil, tamamlayıcı çərçivələr kimi qəbul edilməsini tövsiyə edir. Uyğun cavab evristik mühakiməni aradan qaldırmaq deyil, metakoqnitif fərkdallıq inkişaf etdirməkdir – hansı mühakimə növlərinin sistematik deliberasiyadan faydalandığını tanıma bacarığı. Bu, Mokyr [8] tərəfindən Sənaye Maarifçiliyinin məhsuldarlığının mərkəzi kimi müəyyən edilən kontekstə duyarlı ekspertiza növüdür.

7. Nəticə

Davranış iqtisadiyyatı Homo economicus'un ideallaşdırılmış fiqurunu real agentlərin qeyri-müəyyənlik, koqnitiv məhdudiyət, emosional mürəkkəblik və sosial yerləşdirmə şəraitini necə keçdiyinin daha empirik əsaslı hesabı ilə əvəz etmişdir. Məhdud rasionallıq [2], perspektiv nəzəriyyəsi [3], ikili proses nəzəriyyəsi [4, pp. 19-30] və sosial təsirin təhlili sahibkarlıqdan ətraf mühitin mühafizəsinə qədər geniş sahələrdə məhsuldar olduğunu sübut etdi.

Bu məqalə rasionaldan kənara çıxmaların həm insan idraksallığının memarlığını, həm də qərarların verildiyi sosial–institusional kontekstləri əks etdirən sistematik nümunələr olduğunu iddia etmişdir. Üstünlük formalaşması psixoloji, sosial, iqtisadi və kontekstual amillərin mürəkkəb qarşılıqlı təsirini əhatə edir. Sahə Qərbrmərkəzli bilgi bazasına qarşı çıxmalı, davranış prinsiplərinin müxtəlif iqtisadi, institusional və mədəni mühitlərdə – eləcə də evristik qərar qəbuletmənin adaptiv dəyərinin tam qiymətləndirildiyi kontekstlərdə [9] – necə özünü göstərdiyini araşdırmalıdır.

Praktiki baxımdan davranış iqtisadiyyatının nəticələri həm fərdi qərar qəbul edənlər, həm də siyasətçilər üçün dəyərlidir. Fərdlər öz koqnitiv qəzəzlərini tanıyaraq metakoqnitif nəzarəti gücləndirə, təşkilatlar isə qərar proseslərini struktur baxımından yenidən dizayn edərək sistematik səhvləri azalda bilər. Siyasət səviyyəsində işarə vermə alətləri məcburiyyət olmadan ictimai rifahı artırmaq potensialına malikdir, lakin onların tətbiqi diqqətli empirik qiymətləndirmə və etik nəzarət tələb edir. Yekun olaraq, davranış iqtisadiyyatının gələcək inkişafı nəzəri inteqrasiya, metodoloji ciddilik və kontekstual həssaslığın birləşməsindən asılı olacaqdır.

ƏDƏBİYYAT

1. Alrohaem N., Gallage N.G., Islam S. The impact of behavioral economics on entrepreneurial decision-making: A systematic literature review. *Journal of Entrepreneurship in Emerging Economies*, 2026, Vol. 18, No 7, pp. 1–43.
2. Simon H.A. A Behavioral Model of Rational Choice. *The Quarterly Journal of Economics*, 1955, Vol. 69, No 1, pp. 99–118.
3. Kahneman D., Tversky A. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, 1979, Vol. 47, No 2, pp. 363–391.
4. Kahneman D. *Thinking, Fast and Slow*. New York, "Farrar, Straus and Giroux", 2011, 499 p.
5. Tversky A., Kahneman D. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science*, 1974, Vol. 185, No 4157, pp. 1124–1131.
6. Thaler R.H., Sunstein C.R. *Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness*. New Haven, "Yale University Press", 2008, 293 p.
7. Frey B.S., Jegen R. Motivation Crowding Theory. *Journal of Economic Surveys*, 2001, Vol. 15, No 5, pp. 589–611.
8. Mokyr J. The European Enlightenment, the Industrial Revolution, and Modern Economic Growth. *Max Weber Lecture Series (MWP-LS)*, 2007, No 07, pp. 1–43.
9. Gigerenzer G., Gaissmaier W. Heuristic Decision Making. *Annual Review of Psychology*, 2011, Vol. 62, No 1, pp. 451–482.
10. Mokyr J. *The Lever of Riches: Technological Creativity and Economic Progress*. New York, "Oxford University Press", 1990, 350 p.

**DAVRANIŞ İQTISADİYYATI VƏ QƏRAR QƏBULETMƏ:
KOQNITIV QƏRƏZLƏR, EVRISTIKA VƏ SIYASƏT NƏTİCƏLƏRİ**

C.G.Hacıyev, Z.R.İsgəndərov, S.T.Məmmədov

Xülasə. Davranış iqtisadiyyatının əsas elm sahəsi kimi yüksəlişi, iki əsrdən artıq iqtisadi təhlili əsaslandıran klassik rasionallıq seçimi çərçivəsini kökündən sual altına almışdır. Psixoloji və koqnitiv anlayışları iqtisadi modelləşdirməyə daxil etməklə davranış iqtisadiyyatı, fərdlərin, firmaların və sahibkarların qeyri-müəyyənlik, məhdud rasionallıq və emosional təsir şəraitindəki qərar qəbuletmə prosesi barədə daha zəngin, empirik baxımdan əsaslandırılmış bir izah təqdim edir. Bu məqalə, koqnitiv qərəzlərin, evristikanın, emosional vəziyyətlərin və kontekstual amillərin iqtisadi davranışı necə formalaşdırdığını araşdırmaq məqsədilə nəzəri və empirik ədəbiyyatı sintez edir. Rasionaldan kənara çıxmaların proqnozlaşdırıla bilən sistemə uyğun nümunələr olduğunu, ədəbiyyatdakı metodoloji boşluqları, o cümlədən inkişaf etməkdə olan iqtisadiyyat kontekstlərinin az təmsil olunmasını müəyyən edən məqalə, uyğunlaşdırıcı ekspertizanı məhdud rasionallıqla uzlaşdıran daha inteqrativ çərçivəyə çağırır.

Açar sözlər: *davranış iqtisadiyyatı, qərar qəbuletmə, koqnitiv qərəzlər, evristika, işarə vermə nəzəriyyəsi.*

Accepted: 02.06.2026

AI-POWERED CHATBOTS IN DIGITAL COMMUNICATION: NLP ARCHITECTURE, APPLICATIONS AND ETHICAL CHALLENGES

Gulnar Majid Naghiyeva¹, Firudin Tarlan Aghayev²

¹Baku State University, Baku, Azerbaijan

gulnar.naghiyeva17@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-6971-0887>

²Ministry of Science and Education Institute of Information Technology, Baku, Azerbaijan

agayevinfo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7660-1406>

Abstract. The paper discusses the history of chatbot systems and their emergence according to artificial intelligence and the importance that they are gaining in the contemporary digital world. It looks at the basic principles behind chatbots, namely their types, architecture and the underlying technologies, which are the natural language processing and machine learning. Another aspect that is mentioned by the study in terms of the primary areas of application of AI-powered chatbots is education, healthcare, and customer services where they improve efficiency and interaction with a user.

Besides, the paper explains the main benefits of chatbot systems including their 24/7 availability, quick response rate, and the ability to communicate with people in a personalized manner and weaknesses including the ethical concerns and the incapacity to understand human complex language. Lastly, the paper highlights the future possibilities of chatbot technologies when there is the development of more intelligent and human-like chatbots through the further progress of generative AI and large language models. On the whole, the systems of AI chatbots are becoming the inseparable part of the contemporary reality and digital transformation.

Keywords: *Chatbots, Natural Language Processing, Machine Learning, Human-Computer Interaction.*

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Introduction

Artificial intelligence is doing a lot of things today. For example, it creates software that performs complex tasks. Which is integrated into our daily lives through these intelligent agents. Chatbots are one of the most common examples of these systems and is based on Human-Computer Interaction. There is no longer a need to speak 'machine language' with technology. These intelligent systems are able to assimilate human speech and speak to you in the same language and with the same emotions.

The history of chatbots began with ELIZA, the first psychological simulation created in 1966, and was later further developed under the name ALICE in 1995 and reached the level of today's modern artificial intelligence.

The importance of this technology is creating significant changes not only in entertainment, but also in business, education and e-commerce. The biggest advantage of chatbots is that they know no borders: they are available 24/7, can answer questions from thousands of people at the same time, and work equally effectively on any platform. These tools, which reduce costs and improve customer satisfaction in business, as well as facilitate rapid access to information in the educational process, have become an integral part of the modern digital ecosystem.

Despite the widespread deployment of chatbot systems in digital platforms nowadays, various people and organizations face several challenges related to accuracy, context, personalization, data privacy and ethical uses. It is essential, then, to look at how these AI-powered chatbot systems are created, which technologies support them and where they can be applied in reality. The objective of the paper is to study the development of AI-powered chatbot systems focusing on their architecture, NLP components, machine learning methods, areas of application, advantages, limitations, and further development perspectives.

Methodology

This study uses a descriptive, analytical, and comparative research approach to examine AI-powered chatbot systems in digital communication. The methodology is based on the analysis of existing scientific literature related to artificial intelligence, chatbot architecture, natural language processing, machine learning, generative AI, and ethical issues. Since the study is theoretical in nature,

it does not include experimental implementation or statistical testing. Instead, it focuses on the systematic interpretation and comparison of existing concepts and approaches.

The research follows a three-dimensional analytical model. The first dimension is the architectural analysis of chatbot systems. In this part, the study examines the main components of chatbot architecture, including user input processing, natural language understanding, intent recognition, context management, dialogue management, and response generation. This dimension explains how chatbot systems process user requests and produce relevant responses.

The second dimension is the technological analysis. This part focuses on the role of machine learning, deep learning, transformer-based models, and generative AI in chatbot development. In addition, rule-based and AI-based chatbot systems are compared according to their working principles, flexibility, context understanding, and response generation abilities. This comparison helps to show the advantages of modern AI-powered chatbots over traditional rule-based systems.

The third dimension is the practical and ethical analysis. In this direction, the study examines the application of AI-powered chatbots in education, healthcare, and customer service. At the same time, the main limitations and ethical challenges of chatbot systems are analyzed, including data privacy, response accuracy, bias, security, and the possible effects of human-like communication on users.

Overall, this methodological approach makes it possible to evaluate AI-powered chatbot systems not only as technical tools, but also as practical digital assistants and ethically sensitive communication systems. Through descriptive analysis, comparison, and thematic evaluation, the study presents a structured overview of the development, application, advantages, and challenges of AI-powered chatbots.

Artificial intelligence: a modern approach

The goal of artificial intelligence is not just to create software, it also understands information from the environment and learns by performing certain steps. Unlike previous eras, the concept of AI does not depend on rules predetermined by humans, but instead uses large amounts of data and machine learning methods. These systems do not simply execute given commands, but also try to understand people's goals and realize them in the most accurate way.

AI applications range from microelectronic devices to global online services. From strategic victories on the chessboard to driverless cars navigating city streets to spacecraft exploring distant planets, this technology is now present in every aspect of our lives. Artificial intelligence can now analyze text and images, and can even detect nuclear explosions by monitoring seismic movements. This technology is now an integral part of areas where even the smallest details are vital. All of these applications not only increase the impact of AI on society, but also raise important issues such as ethics, security, and trust [1, pp. 1–20].

Chatbots are not robots that repeat pre-prepared answers, the main strength of these systems is their ability to sense the subtleties of human language and speak the same language as us in the digital world. These systems move away from classic text analysis, deeply process the structure of the language and create a real dialogue environment with the user. If earlier this technology was based only on matching some keywords, today chatbots have become intelligent systems that understand complex queries and make decisions based on the context.

There are two different working principles behind this technology: 'hard algorithms' that are limited by the programmer's instructions, and artificial intelligence models that learn from data. The former are like a traveler with a precise map in his hand; they only move along pre-drawn 'if this, then do this' paths. These systems cannot go beyond the logic built for them by the programmer and only provide predictable answers to familiar questions. Artificial intelligence-based models, on the other hand, do not stick to ready-made scenarios, unlike their predecessors. Thanks to the power of machine learning, these systems learn something new from every conversation and determine more quickly what the user wants to say, 'feeling' it like a human being [2, pp. 1–15].

Chatbot Architecture

The architecture of a chatbot system refers to the internal structure and working mechanism that enables the chatbot to understand user input, process information, and generate an appropriate response [2, pp. 1-15]. A successful chatbot is not created only by writing simple program codes. It requires a well-planned strategy, a clear communication style, and a properly designed dialogue structure. At the beginning of the development process, the purpose of the chatbot, the target user group, and the tone of communication must be defined. This stage is important because the chatbot's interaction style directly affects user satisfaction and trust.

One of the main components of chatbot architecture is the identification of user intent. For this purpose, developers create intent maps that help the system understand what the user wants to achieve. For example, a user may ask for information, request support, make a complaint, or search for a specific service. The chatbot should correctly classify these intentions and choose the most suitable response. In addition, dialogue flow charts are prepared to predict possible conversation paths. These flow charts help the chatbot manage different user questions and maintain a logical conversation [2, pp. 1–15].

Another important element of chatbot architecture is context management. A quality chatbot should not treat every message as an isolated sentence. Instead, it should remember previous parts of the conversation and respond according to the context. For example, if a user first asks about a course and then asks “When does it start?”, the chatbot should understand that the second question is related to the same course. This ability makes the chatbot more useful and more natural in communication. Context management also helps the system avoid repetitive questions and provide more personalized answers [3, pp. 15–30].

Natural Language Processing (NLP) plays a central role in chatbot architecture. NLP analyzes the text entered by the user, breaks it into smaller parts, identifies important words and expressions, and converts the message into a format that can be understood by the machine. Through this process, the chatbot can recognize the structure and meaning of human language. Intent recognition, entity recognition, and text classification are among the most important NLP tasks used in chatbot systems [3, pp. 15–30], [4, pp. 1–40].

The dialogue manager is another essential part of the chatbot system. It controls the flow of communication between the user and the chatbot. After the user's intent is recognized, the dialogue manager decides what action should be taken next. It may select a ready answer, search for information in a database, ask an additional question, or transfer the conversation to a human operator. Therefore, the dialogue manager acts as the decision-making center of the chatbot [3, pp. 15–30], [8].

The final stage of chatbot architecture is response generation. At this stage, the system prepares an answer and sends it to the user in a natural and understandable form. In rule-based chatbots, responses are usually selected from predefined templates. However, in AI-based chatbots, responses can be generated dynamically according to the user's question and the context of the conversation [3, pp. 15–30]. This makes AI-powered chatbots more flexible, interactive, and human-like.

Overall, chatbot architecture consists of several connected components, including user input processing, natural language understanding, intent recognition, context management, dialogue management, and response generation. These components work together to create a meaningful dialogue between humans and machines. As a result, modern chatbots are no longer simple question-answer tools; they have become intelligent systems capable of understanding user needs and supporting digital communication in a more effective way.

Machine Learning and Generative AI in Chatbot Development

Traditional chatbots rely mostly on rule-based systems. They act based on set orders and fixed response patterns. While they can handle basic tasks, these systems break if the user poses a more complex or unexpected query. Rule-based chatbots can only follow the developer-created scenarios and find it hard to adapt to new situations [2, pp. 1–15].

Machine learning chatbots are more adaptable as they leverage past conversations and large data to improve. Systems analyze user messages to identify patterns and improve responses over time. Rather than being fixed by rules only, user inputs are analyzed, intentions are classified and more suitable answers are generated in context [1, pp. 1–20], [2, pp. 1–15], [3, pp. 15–30].

Recent advancements in chatbot systems are related to deep learning, transformer models, and large language models. These technologies enable the creation of conversations that are more natural, flexible, and contextual. Contrary to the simple rule-based bots, people are most familiar with the use of generative AI chatbots. These AI chatbots can form new responses as per the current situation rather than just selecting from any prepared answers [3, pp. 15–30].

Generative AI enhances the capabilities of chatbots to assist users in various fields. Such systems, for example, can clarify educational topics, summarize information, assist customer service, and personalize feedback. Generative AI must also conform to rigorous specifications concerning accuracy, data privacy, ethical design, and oversight by human operators. As a result, it's important to consider these technical tools (machine learning and generative AI) as important elements of responsible digital communication. The main differences between rule-based and AI-based chatbot systems are presented in Table.

Comparison of Rule-Based and AI-Based Chatbot Systems

Feature	Rule-based Chatbots	AI-based Chatbots
Working principle	Predefined rules	Learning from data
Flexibility	Limited	High
Context understanding	Weak	Stronger
Response type	Fixed answers	Dynamic answers
Example use	FAQ bots	ChatGPT-like systems

Application Areas of AI-Powered Chatbots

Today's intelligent chatbots are based on complex dialogue systems, where the understanding module, dialogue manager and response block work as a single mechanism. Such an approach takes communication out of a static state and forms a dynamic system that analyzes the conversation history and acts according to the context. The initial stage of the architecture involves filtering and structuring the text. Here, through tokenization and lemmatization (root finding), the information layer is made ready for internal analysis. As a result, the system is able to respond flexibly and logically even to completely new and unusual expressions [5].

Artificial intelligence has made our daily lives easier, and we use it in areas such as education, customer service, healthcare, and performance enhancement. One of the most common examples of artificial intelligence in the world of education is chatbots. According to research, chatbots are used to present course materials to students, answer their questions, and create a personalized learning experience. This technology provides unlimited support to students and improves their learning process. It also reduces the burden on teachers and allows them to engage in more academic activities.

Chatbots are one of the key technologies that increase efficiency in the field of customer service. They respond to customer requests instantly, reducing waiting times and can serve a large number of users at the same time. This leads to both cost reduction and improved service quality for companies. At the same time, chatbots solve simple problems, and in more complex cases, they redirect to human operators [6].

In the healthcare sector, chatbots are used to provide patients with preliminary information, evaluate simple symptoms, remind users about medical services, and guide them to appropriate healthcare support. These systems make medical information more accessible by giving quick responses to patient questions. At the same time, they can reduce the workload of healthcare professionals by answering frequently asked questions and supporting initial communication with patients.

However, healthcare chatbots should not replace doctors, because incorrect or incomplete information may create serious risks for patients. Therefore, they should be used as supportive tools under proper medical and ethical control. Consequently, there is an increase in the productivity of the employees as well as user satisfaction [6].

Advantages, Limitations and Ethical Challenges of AI-Powered Chatbots

A primary benefit of AI chatbots is that the chatbots operate 24 hours. Technology enables the user to start with the service at any time and the use of such technology will remove reliance on the conventional business hours. The feature grows satisfaction among the users particularly in customer service. Chatbots can reply to the customer queries very fast and instantaneously. AI chatbots would have a massive effect on the time of response as well as the efficiency of the service process. This will enhance the user experience as well as turning the overall operation efficiency up. The AI chatbots have the capability of offering a personalized service to users by analyzing user data. Such systems generate more interesting service by offering answers to the needs of the user [6].

AI chatbots have a number of ethical concerns. Specifically, the issues of privacy, security of user information, and the effect of a human type of communication with the user are the key issues. The mimicking nature of chatbots may make them appear trustworthy by humans and also sway their choices. Furthermore, the absence of sufficient ethical regulations to be established in the design and utilization of such systems is also referred to as a major issue. The other significant issue of chatbots is to do with the accuracy level of the same. Such systems are at times known to give wrong or inaccurate information. This may cause wrong diagnosis or prescriptions particularly in healthcare field [7].

The contextual understanding does not assure complete understanding by the AI systems, potentially creating a risk to users. The issue of bias is also present with AI chatbots. This is mainly due to the fact that the training that they are trained on is skewed or asymmetrical. Consequently, chatbots might provide some categories of users with unfair or wrong responses. This may be very detrimental, particularly in the healthcare and social sectors [8].

The technology of chatbots is likely to evolve in the future due to even more intelligent and human-like forms. Due to generative AI and large language models (such as ChatGPT), not only will chatbots be content with providing answers, but they will also be capable of producing new content related to the situation and be more aware of the needs of the user. Due to the development, chatbots would become more natural and empathetic and personalized in communication. Meanwhile, their combination with other technologies will be enlarged, which opens opportunities to make their use more efficient and popular in the educational, healthcare, and customer service spheres.

Conclusion

To sum up, artificial intelligence has considerably altered the evolution of chatbot systems as it has become a necessity in many aspects of life, including education, health care, and customer service. According to the AI-powered chatbots can improve communication through providing a fast, efficient and individualized interaction between users which enhances user experience and operational efficiency. Furthermore, a combination of the natural language processing and machine learning technology has allowed human language to be understood by chatbots better, and they have become more precise in reaction. Regardless of some obstacles, such as the ethical aspect in the technology and the lack of knowledge to answer intricate questions, the ongoing development in the field of AI technologies is fixing the established problems. In the future, the chatbot systems are likely to evolve and become more sophisticated, human-like and more popular. The creation of massive language models and generative AI will also improve their functionality and will permit more natural and intelligent interaction. Thus, chatbots powered by AI will remain instrumental in the development of the digital communication and smart systems in the future.

REFERENCES

1. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4th ed. Harlow, Pearson Education Limited, 2021, 1168 p.
2. Raj S. Building Chatbots with Python. Berkeley, Apress, 2019, 192 p.
3. Jurafsky D., Martin J.H. Speech and Language Processing. 3rd ed. draft. Stanford, Stanford University, 2023, 628 p.
4. Bird S., Klein E., Loper E. Natural Language Processing with Python. Sebastopol, O'Reilly Media, 2009, 504 p.
5. Bocklisch T., Faulkner J., Pawlowski N., Nichol A. Rasa: Open Source Language Understanding and Dialogue Management. arXiv preprint arXiv:1712.05181, 2017.
6. Okonkwo C.W., Ade-Ibijola A. Chatbots applications in education: A systematic review. Computers and Education: Artificial Intelligence, 2021, Vol. 2, Article 100033.
7. Harvard Business School. When AI Chatbots Help People Be More Human. Harvard Business School Working Knowledge, 2023. Available at: <https://www.library.hbs.edu/working-knowledge/when-ai-chatbots-help-people-be-more-human>
8. Leveraging AI-Powered Chatbots to Enhance Customer Service Efficiency and Future Opportunities in Automated Support. ResearchGate, 2024. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/385230161>

Accepted: 02.06.2026

PASCAL PROQRAMLAŞDIRMA DİLİ: SİSTEMATİK TƏDRİS METODOLOGİYASI VƏ MÜASİR İNFORMASIYA SİSTEMLƏRİNDƏ TƏTBİQİ

Vüqar İbrahim oğlu Salmanov, Rəhimə Yusif qızı Hacıyeva
Naxçıvan Dövlət Universiteti, Naxçıvan, Azərbaycan

PASCAL PROGRAMMING LANGUAGE: SYSTEMATIC TEACHING METHODOLOGY AND APPLICATION IN MODERN INFORMATION SYSTEMS

Vugar Ibrahim Salmanov, Rahima Yusif Hajiyeva

Nakhchivan State University, Nakhchivan, Azerbaijan

vuqarsalmanov@ndu.edu.az, rahimahaciyeva@ndu.edu.az

<https://orcid.org/0000-0002-2261-0243>, <https://orcid.org/0009-0002-9679-6391>

Abstract. This article extensively examines the historical development, technical structure, and role of the Pascal language in modern educational technologies. Created by Professor Niklaus Wirth, Pascal is considered an indispensable tool for teaching programming as a logical and systematic discipline. Within the research, the roots of the language from Algol 60, its extensive data structures, and control mechanisms are analyzed from a scientific-theoretical perspective. The article argues that Pascal is not limited to academic environments but also plays a crucial role in modern cloud technologies, neural data servers, and the creation of interactive multimedia training programs (VBA-based), supported by programming examples. The research results indicate that Pascal's rigorous syntactic structure remains the most effective means for developing algorithmic thinking in students.

Keywords: Pascal, systematic programming, data structures, neural servers, recursion, educational technologies.

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Giriş. Cəmiyyətin informasiyalaşması prosesi müasir dövrün əsas inkişaf istiqamətlərindən biridir. Bu proses məlumatların toplanması, saxlanması, emalı və ötürülməsinin insan fəaliyyətinin ayrılmaz hissəsinə çevrilməsi ilə xarakterizə olunur. Təhsilin informasiyalaşdırılması isə tədris prosesinin müasir informasiya texnologiyaları ilə zənginləşdirilməsini və yeni pedaqoji yanaşmaların tətbiqini zəruri edir [4].

Bu baxımdan gələcək informatika müəllimlərinin həm fundamental proqramlaşdırma biliklərinə, həm də müasir informasiya-kommunikasiya texnologiyalarından istifadə bacarıqlarına yiyələnməsi xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Multimedia və interaktiv tədris vasitələri təlim prosesinin səmərəliliyini artırmaqla yanaşı, tələbələrin fəallığını və alqoritmik düşünmə qabiliyyətini inkişaf etdirir [4].

Proqramlaşdırmanın sistemli şəkildə tədrisində mühüm rol oynayan vasitələrdən biri Pascal proqramlaşdırma dilidir. Bu dil proqramlaşdırma prinsiplərinin ardıcıl və məntiqli şəkildə mənimsənilməsinə şərait yaratdığı üçün uzun illərdə təhsil mühitində öz aktuallığını qoruyub saxlayır.

Pascal proqramlaşdırma dili 1960-cı illərin sonunda Sürixdəki İsveçrə Federal Texnoloji İnstitutunda (ETH Zurich) professor Niklaus Virt tərəfindən hazırlanmışdır [3], [5, s. 1]. Virtin bu dili yaratmaqda iki əsas məqsədi var idi: birincisi, proqramlaşdırmanı müəyyən fundamental anlayışlara əsaslanan sistemlik bir intizam kimi öyrətmək üçün uyğun bir dil yaratmaq; ikincisi isə bu dili mövcud kompüterlərdə etibarlı və səmərəli şəkildə tətbiq etmək idi [5, s. 1]. Müəllif o dövrdə istifadə olunan dillərin konstruksiyalarının məntiqli izahının olmamasından dərgin narazılığını bildirirdi [5, s. 1]. Virt inanırdı ki, tələbəyə fikirlərini ifadə etmək üçün öyrədilən dil onun təfəkkür tərzinə kəskin təsir göstərir və həmin dillərdəki nizamsızlıq birbaşa tələbənin proqramlaşdırma üslubuna keçir [5, s. 1].

Yeni dilin yaradılması yalnız yenilik xatirinə deyil, mövcud dillərin sistemlik struktur tələblərinə cavab verməməsi səbəbindən zərurətə çevrilmişdi. Bu mənada Algol 60 dili Pascal üçün əsas götürülmüşdü, lakin Pascal verilənlərin strukturlaşdırılması imkanlarının genişliyi ilə ondan fərqlənirdi [5, s. 1–2]. Pascal-da proqram iki əsas hissədən ibarətdir: hərəkətlərin təsviri (statements) və bu hərəkətlər tərəfindən idarə olunan verilənlərin təsviri (declarations) [5, s. 2]. Dilin sadəliyini nümayiş etdirən klassik "Hello" proqramı onun strukturunu aydın göstərir:

```
PROGRAM first;
BEGIN
    Write('Hello')
END.
```

Bu proqram nümunəsi göstərir ki, Pascal dilində hər bir blok "BEGIN" və "END" açar sözləri ilə kəskin şəkildə məhdudlaşdırılır [3].

Proqramlaşdırma texnologiyasının tədrisi informatika sahəsində hazırlığın mühüm tərkib hissəsidir. Baxmayaraq ki, son zamanlar Python proqramlaşdırma dili geniş yayılmışdır, mütəxəssislər proqramlaşdırmanı öyrənmək üçün Pascal-ı hələ də ən münasib dil hesab edirlər [4]. Pascal dilinin sintaktik diaqramları, məlumat tipləri və dəyişənlərin elan edilməsi qaydaları proqramçıda ciddi intizam yaradır [4]. Məsələn, iki ədədin cəmini hesablayan proqramda dəyişənlərin əvvəlcədən elan edilməsi zəruridir:

```
PROGRAM add;
VAR
    x, y, z : integer;
BEGIN
    write('Enter first number: ');
    read(x);
    write('Enter second number: ');
    read(y);
    z := x + y;
    write('Sum = ', z)
END.
```

Burada "integer" tipi tam ədədləri, "real" həqiqi ədədləri, "char" simvolları, "boolean" isə məntiqi qiymətləri təmsil edir [3].

Pascal dili təkcə təhsil məqsədli deyil, həm də müasir verilənlər mərkəzlərinin inkişafında mühüm rol oynayır. Məsələn, İndoneziya ibtidai məktəblərində neyral verilən serverlərinin (Neural Data Server) qurulmasında Pascal proqramlaşdırmasından istifadə edilir. Süni intellektin inkişafı MySQL Server əsaslı verilənlər bazası tətbiqlərində həyata keçirilir və Pascal burada inteqrasiya olunmuş verilənlər strukturlarının inkişafına fokuslanır. Verilənlərin analizi və kodifikasiyası rəqəmsal dövrdə sağ qalmaq üçün zəruri olan bacarıqlardır. Pascal dili mərkəzləşdirilmiş və serverlər arasında əlaqəli olan verilənlərin inkişafına xidmət edir [2].

Proqramlaşdırmada təkrar olunan hərəkətlərin icrası üçün Pascal üç növ döngü konstruksiyası təqdim edir: WHILE, REPEAT və FOR. FOR döngüsü hərəkətin əvvəlcədən müəyyən edilmiş sayda yerinə yetirilməsi üçün nəzərdə tutulub [3]:

```
FOR i := 1 TO 10 DO
    writeln('Hello')
```

WHILE döngüsü isə şərt doğru qaldığı müddətcə icra olunur [3]. Pascal-da funksiya və prosedurların, xüsusilə rekursiv zənglərin tətbiqi alqoritmik düşüncəni daha da dərinləşdirir.

Bu cür sistematik yanaşma, tələbələrin proqramlaşdırma texnologiyalarını yalnız kod yazmaq deyil, həm də mürəkkəb sistemləri modullar şəklində layihələndirmək bacarığını artırır [4]. Pascal dili həm klassik informatika təhsilinin, həm də müasir neyral proqramlaşdırma sistemlərinin kəşifində öz aktuallığını qoruyub saxlayır.

Tədqiqatın məqsədi və məsələnin qoyuluşu. Tədqiqatın məqsədi Pascal dilinin sintaktik strukturunu, verilən tiplərini və müasir informasiya sistemlərindəki tətbiq imkanlarını ətraflı şəkildə ortaya qoymaqdır. Məqalədə Pascal-ın təkcə bir dil deyil, həm də alqoritmik düşüncəni formalaşdıran

bir mühit olduğu, xüsusilə neyral verilən serverlərində (Neural Data Server) və interaktiv təlim proqramlarında tətbiqi məsələləri qoyulur [4]. Müasir dövrdə Python kimi dillərin populyarlığına baxmayaraq, proqramlaşdırma texnologiyasının dərinliklərini öyrətmək üçün Pascal-ın hələ də ən uyğun dil olması araşdırılan əsas problemdir.

Pascal dilinin texniki xüsusiyyətləri və sintaktik struktur. Pascal dili iki əsas sütun üzərində qurulub: yerinə yetirilən hərəkətlərin təsviri olan operatorlar (statements) və bu hərəkətlərin tətbiq olunduğu verilənlərin təsviri olan deklarasiyalar. Dilin sintaksisi BNF (Backus-Naur Form) vasitəsilə dəqiq müəyyən edilmişdir və bu da proqramın oxunaqlılığını artırır.

Proqramın ümumi strukturu aşağıdakı kimidir:

```
PROGRAM Program_Adi;
CONST
    Pi = 3.14;
VAR
    radius, sahe : real;
BEGIN
    write('Radiusu daxil edin: ');
    read(radius);
    sahe := Pi * radius * radius;
    writeln('Sahe = ', sahe:5:2);
END.
```

Bu nümunə Pascal-ın dəyişənləri elan etmə (VAR) və icra blokunu (BEGIN-END) necə kəskin ayırdığını göstərir. İstənilən dəyişən istifadədən əvvəl mütləq tipə uyğun elan edilməlidir [1, s. 1].

Verilən tipləri və strukturlaşdırılmış obyektlər. Pascal zəngin verilən tipləri sistemi təqdim edir. Standart skalyar tiplərə INTEGER (tam ədədlər), REAL (həqiqi ədədlər), CHAR (simvollar) və BOOLEAN (məntiqi tip) daxildir [1, s. 1]. Hər bir tip yaddaşda müəyyən yer tutur; məsələn, müasir interpretasiyalarda Real tipi 6 bayt, Integer isə 2 bayt yer tutur.

Lakin Pascal-ın əsas gücü onun strukturlaşdırılmış verilən tiplərindədir:

1. *Dizilər (Arrays)*: Eyni tipli verilənlərin ardıcıl saxlanması üçün istifadə olunur. Məsələn, ARRAY [1..50] OF integer [1, s. 12].

2. *Yazılar (Records)*: Müxtəlif tipli verilənləri bir obyekt altında birləşdirir. Bu, kommersiona yönümlü problemlərin həlli üçün Virt tərəfindən əlavə edilmiş vacib xüsusiyyətdir.

3. *Çoxluqlar (Sets)*: Riyazi çoxluq əməliyyatlarını (birləşmə, kəsişmə, fərq) birbaşa kodda yerinə yetirməyə imkan verir.

Aşağıda yazılar (Record) tipinə aid genişləndirilmiş bir nümunə verilmişdir:

```
TYPE
    Tələbə = RECORD
        Ad: string;
        Yas: integer;
        Qiymet: real;
    END;
VAR
    t1: Tələbə;
BEGIN
    t1.Ad:= 'Ali';
    t1.Yas:= 20;
    t1.Qiymet:= 85.5;
END.
```

İdarəetmə strukturları və döngülər. Pascal proqramlaşdırmada "loop" (döngü) anlayışını üç fərqli konstruksiya ilə təqdim edir: WHILE, REPEAT və FOR. WHILE və REPEAT arasındakı fundamental fərq ondan ibarətdir ki, REPEAT döngüsündə şərt sonda yoxlanılır, buna görə də döngü gövdəsi ən azı bir dəfə icra olunur [1, s. 6]. WHILE döngüsündə isə şərt əvvəldə yoxlanıldığı üçün döngü heç icra olunmaya da bilər.

Şərt operatoru olan IF-THEN-ELSE ilə yanaşı, seçim patternləri üçün daha zərif həll olan CASE operatoru tətbiq edilir [1, s. 11]. Məsələn, ayların gün sayını təyin etmək üçün:

```
CASE ay OF
  1, 3, 5, 7, 8, 10, 12 : gun := 31;
  4, 6, 9, 11 : gun := 30;
  2 : gun := 28;
END;
```

Alt proqramlar və rekursiyanın tətbiqi. Pascal mürəkkəb məsələləri kiçik modullara bölmək üçün Prosedur və Funksiyalardan istifadə edir. Prosedurlar bir qrup nəticə qaytardığı halda, Funksiyalar tək bir qiymət qaytarır [1, s. 14–16]. Pascal-da özünəməxsus bir xüsusiyyət də rekursiyadır – yəni funksiyanın özünü çağırması.

Faktorialın hesablanması üçün rekursiv funksiya nümunəsi [1, s. 17]:

```
FUNCTION fac(n : longint) : longint;
BEGIN
  IF n = 0 THEN fac := 1
  ELSE fac := n * fac(n-1);
END;
```

Bu struktur proqramçıdan dərin məntiqi təhlil tələb edir və sistemə düşüncəni inkişaf etdirir.

Müasir tətbiq sahələri: Neyral verilən serverləri və bulud texnologiyaları. Pascal yalnız dərslərdə qalan bir dil deyil. Son illərdə İndoneziya ibtidai məktəblərində aparılan tədqiqatlar göstərir ki, Pascal proqramlaşdırma dili neyral verilən serverlərinin (Neural Data Server) inkişafı üçün istifadə olunur [2]. Bu sistemlər MySQL serverləri üzərində qurulmuş süni intellekt tətbiqləridir. Pascal burada inteqrasiya olunmuş verilənlər strukturunun yaradılması və verilənlərin kadrlaşdırılması (data codification) üçün əsas alət rolunu oynayır [1, s. 103].

Pascal proqramlaşdırma dilinin müasir dövrdə aktuallığını qoruyan əsas amillərdən biri onun açıq mənbəli inkişaf mühitləri vasitəsilə geniş istifadə olunmasıdır. Xüsusilə Free Pascal Compiler (FPC) və Lazarus inteqrasiya olunmuş inkişaf mühiti (IDE) Pascal dilinin tədrisi və praktik tətbiqi üçün geniş imkanlar yaradır. Free Pascal müxtəlif əməliyyat sistemlərini (Windows, Linux və macOS) dəstəkləyən yüksək məhsuldarlıqlı kompilyator olmaqla yanaşı, obyekt-yönümlü proqramlaşdırma imkanları da təqdim edir. Lazarus platforması isə Free Pascal əsasında qurulmuş vizual proqramlaşdırma mühiti kimi istifadəçilərə qrafik interfeysli tətbiqlərin hazırlanmasına şərait yaradır.

Bu platformalar vasitəsilə təhsil müəssisələrində tələbələr verilənlər bazaları ilə işləyən proqramlar, kalkulyatorlar, informasiya idarəetmə sistemləri və müxtəlif tədris yönümlü tətbiqlər hazırlaya bilərlər. Bundan əlavə, açıq mənbəli layihələrin mövcudluğu tələbələrə hazır proqram kodlarının təhlili, proqram təminatının təkmilləşdirilməsi və proqram mühəndisliyi prinsiplərinin mənimsənilməsi baxımından mühüm təcrübə qazandırır.

Müasir tədris praktikasında Lazarus və Free Pascal mühitləri alqoritmlərin vizuallaşdırılması, verilənlər strukturlarının öyrədilməsi və proqramlaşdırmanın əsas prinsiplərinin mənimsədilməsi üçün geniş istifadə olunur. Bu platformaların açıq mənbəli olması onların təhsil müəssisələrində əlavə lisenziya xərcləri olmadan tətbiqinə imkan verir və Pascal dilinin müasir proqramlaşdırma təhsilində əhəmiyyətini qoruyub saxlamasına şərait yaradır.

Müasir informasiya sistemlərində proqramlaşdırma dilləri yalnız tətbiqi proqramların hazırlanmasında deyil, həm də verilənlərin emalı, server xidmətlərinin təşkili və alqoritmik proseslərin idarə olunmasında mühüm rol oynayır. Pascal dilinin güclü tip nəzarəti, strukturlaşdırılmış proqramlaşdırma prinsipləri və modullu yanaşması bulud texnologiyaları və paylanmış informasiya sistemlərinin əsas məntiqinin öyrədilməsi üçün əlverişli vasitə hesab olunur. Blockchain və Cloud Computing kimi texnologiyaların iş prinsiplərinin mənimsənilməsi zamanı Pascal dilində qurulan modellər və alqoritmlər tələbələrə verilənlərin saxlanılması, ötürülməsi və emalı proseslərini daha sistemli şəkildə başa düşməyə imkan verir.

Cədvəl 1

Blockchain və Bulut hesablamalarının müqayisəli analizi [1, s. 110]

№	Xüsusiyyət	Blockchain	Cloud Computing
1	Cihaz növü	Çoxsaylı cihazlar	Mərkəzləşmiş tək cihaz
2	Verilən saxlanıcı	Hər cihazda saxlanılır	Mərkəzi verilənlər mərkəzi
3	Verifikasiya	Fərdi şəkildə	Mərkəzi IP vasitəsilə

Cədvəl 1-dən görüldüyü kimi, Blockchain və Cloud Computing sistemləri verilənlərin saxlanılması və idarə olunması baxımından fərqli prinsiplərə əsaslanır. Pascal dili bu texnologiyaların özünün yaradılmasında geniş istifadə olunan əsas vasitə olmasa da, onların iş mexanizmlərinin öyrədilməsi və modelləşdirilməsi üçün əlverişli tədris platforması rolunu oynayır. Xüsusilə verilənlər strukturları, massivlər, yazılar (records), fayl sistemləri və alqoritmlərin reallaşdırılması vasitəsilə tələbələr paylanmış və mərkəzləşdirilmiş sistemlərin məntiqini praktik olaraq mənimsəyə bilirlər. Bu baxımdan Pascal müasir informasiya sistemlərinin nəzəri əsaslarının tədrisində öz əhəmiyyətini qoruyub saxlayır.

Üstünlüklər, məhdudiyyətlər və müqayisə. Pascal proqramlaşdırma dili güclü tip nəzarəti (strong typing), strukturlaşdırılmış proqramlaşdırma prinsipləri və aydın sintaktik quruluşu ilə seçilir. Bu xüsusiyyətlər proqramlaşdırmaya yeni başlayanların dəyişən tiplərini, verilənlər strukturlarını və alqoritmik yanaşmaları daha sistemli şəkildə mənimsəməsinə imkan verir. Müasir dövrdə Python proqramlaşdırma dili geniş istifadə olunsa da, Pascal və Python dillərinin tədris baxımından müqayisəsi göstərir ki, hər iki dil fərqli üstünlüklərə malikdir.

Cədvəl 2

Pascal və Python dillərinin tədris baxımından müqayisəsi

Meyar	Pascal	Python
Tip yoxlaması	Güclü tip nəzarəti, dəyişənlər əvvəlcədən elan olunur	Dinamik tip sistemi, dəyişənlərin əvvəlcədən elanına ehtiyac yoxdur
Sintaksis	Daha ciddi və strukturlaşdırılmış	Daha sadə və çevik
Oxunaqlılıq	Yüksək, lakin daha çox sintaktik qayda tələb edir	Yüksək və qısa yazılışa malikdir
Alqoritmik düşüncənin inkişafı	Yüksək səviyyədə təşviq edir	Alqoritmlərlə yanaşı praktik tətbiqlərə üstünlük verir
Tədrisdə istifadəsi	Proqramlaşdırmanın fundamental əsaslarının öyrədilməsi üçün əlverişlidir	Sürətli tətbiq inkişafı və müasir texnologiyaların öyrədilməsi üçün əlverişlidir
Səhvlərin aşkarlanması	Kompilyasiya mərhələsində daha çox səhv aşkarlanır	Bir çox səhvlər proqramın icrası zamanı müəyyən edilir
Öyrənmə mərhələsi	Sistemli və ardıcıl yanaşma formalaşdırır	Başlangıç səviyyədə daha sürətli mənimsənilir

Cədvəl 2-dən göründüyü kimi, Python istifadə rahatlığı və geniş tətbiq sahələri ilə seçilsə də, Pascal proqramlaşdırmanın fundamental prinsiplərinin mənimsənilməsi baxımından mühüm üstünlüklərə malikdir. Xüsusilə dəyişənlərin məcburi elan olunması, verilən tiplərinin ciddi yoxlanılması və proqram strukturunun dəqiq müəyyənləşdirilməsi tələblərdə proqramlaşdırma intizamının formalaşmasına kömək edir. Buna görə də bir çox təhsil müəssisələrində Pascal proqramlaşdırma giriş mərhələsində, Python isə daha mürəkkəb tətbiqlərin hazırlanması mərhələsində istifadə olunur.

Tədqiqatın elmi yeniliyi. Pascal proqramlaşdırma dilinin yalnız klassik tədris vasitəsi kimi deyil, həm də müasir proqramlaşdırma mühitləri və informasiya sistemləri kontekstində sistemli şəkildə qiymətləndirilməsindən ibarətdir. Məqalədə Pascal dilinin sintaktik xüsusiyyətləri, strukturlaşdırılmış proqramlaşdırma prinsipləri və alqoritmik təfəkkürün formalaşdırılmasına təsiri müasir açıq mənbəli inkişaf platformaları (Free Pascal və Lazarus) ilə əlaqəli şəkildə təhlil edilmişdir. Eyni zamanda Pascal dilinin tədris potensialı Python proqramlaşdırma dili ilə müqayisəli aspektdə araşdırılmış, onun fundamental proqramlaşdırma biliklərinin mənimsənilməsindəki üstünlükləri əsaslandırılmışdır. Bununla yanaşı, Pascal dilinin yalnız təhsil mühitində deyil, verilənlərin emalı və informasiya sistemlərinin modelləşdirilməsi kimi tətbiq sahələrində istifadə imkanları ümumiləşdirilərək vahid konseptual yanaşma çərçivəsində təqdim edilmişdir.

Tədqiqat metodları. Tədqiqat zamanı müqayisəli təhlil, sistemli yanaşma və ədəbiyyat araşdırması metodlarından istifadə edilmişdir. İlk mərhələdə Pascal proqramlaşdırma dilinin sintaktik xüsusiyyətləri, verilənlər strukturları və idarəetmə mexanizmləri üzrə elmi mənbələr təhlil edilmişdir. Daha sonra Pascal və Python proqramlaşdırma dilləri tədris baxımından müqayisə olunaraq onların tip yoxlaması, proqram strukturunun təşkili, oxunaqlılıq səviyyəsi və alqoritmik düşüncənin formalaşdırılmasına təsiri araşdırılmışdır.

Tədqiqat çərçivəsində Lazarus və Free Pascal platformalarının tədris prosesində tətbiq imkanları nəzərdən keçirilmiş, həmçinin İndoneziya məktəblərində həyata keçirilmiş Neural Data Server layihəsinin nəticələri öyrənilmişdir. Əldə olunmuş məlumatlar sistemləşdirilmiş, müxtəlif mənbələrdən alınan nəticələr müqayisə edilmiş və ümumiləşdirilmişdir. Beləliklə, tədqiqatın metodoloji əsasını müqayisəli analiz, məzmun təhlili və sistemli elmi ümumiləşdirmə təşkil etmişdir.

Nəticə. Aparılmış müqayisəli təhlil göstərir ki, Pascal proqramlaşdırma dili proqramlaşdırmanın fundamental prinsiplərinin tədrisində öz aktuallığını qorumaqdadır. Pascal və Python dillərinin müqayisəsi nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, Pascal güclü tip nəzarəti və strukturlaşdırılmış sintaksisi hesabına tələblərdə proqramlaşdırma intizamının və alqoritmik düşüncənin formalaşmasına daha əlverişli şərait yaradır.

Tədqiqat zamanı araşdırılan Free Pascal və Lazarus platformaları göstərir ki, Pascal yalnız klassik tədris dili deyil, həm də müasir proqram təminatının hazırlanması üçün istifadə olunan praktik inkişaf mühitlərinə malikdir. Bu platformalar vasitəsilə müxtəlif tədris layihələrinin və tətbiqi proqramların hazırlanması mümkündür.

Həmçinin İndoneziya məktəblərində tətbiq edilən Neural Data Server layihəsinin təhlili Pascal dilinin verilənlərin emalı və strukturlaşdırılması ilə bağlı müasir tətbiqlərdə də istifadə oluna bildiyini göstərmişdir. Aparılmış müqayisəli araşdırmanın nəticələrinə əsasən belə qənaətə gəlmək olar ki, Pascal proqramlaşdırmanın əsaslarının öyrədilməsi mərhələsində yüksək səmərəliliyə malik olmaqla yanaşı, müasir inkişaf mühitləri ilə inteqrasiya olunaraq praktik əhəmiyyətini də qoruyub saxlayır.

Tədqiqatın elmi yeniliyi Pascal dilinin tədris potensialının yalnız nəzəri aspektdə deyil, həm də müasir açıq mənbəli platformalar və informasiya sistemləri kontekstində qiymətləndirilməsindədir. Əldə olunan nəticələr proqramlaşdırmanın tədrisi metodikasının təkmilləşdirilməsi istiqamətində istifadə oluna bilər.

ƏDƏBİYYAT

1. Kərimov S.Q., Həbibullayev S.B., İbrahimzadə T.İ. İnformatika. Bakı, 2010, 197 s.
2. Muzaki F.I. Pascal Programming in Neural Data Server for Indonesian Elementary Schools. Malang, Atlantis Press, 2021, s.102–126.
3. Pascal Programming. Tutorial and Manual. Technical Report, s.133–161.
4. Salmanov V. The Capabilities of Visual Basic for Applications in Creating a Demonstration and Training Course for the Course “Programming in Pascal”. German International Journal of Modern Science, 2025, №98, s.32–38.
5. Wirth N. The Programming Language Pascal (Revised Report). Zurich, ETH Zurich, 1972, 49 s.

PASCAL PROQRAMLAŞDIRMA DİLİ: SİSTEMATİK TƏDRİS METODOLOGİYASI VƏ MÜASİR İNFORMASIYA SİSTEMLƏRİNDƏ TƏTBİQİ

V.İ.Salmanov, R.Y.Hacıyeva

Xülasə. Bu məqalədə proqramlaşdırma dünyasında fundamental rol oynamış Pascal dilinin tarixi inkişafı, texniki strukturu və müasir təhsil texnologiyalarındakı yeri geniş şəkildə araşdırılır. Professor Niklaus Virt tərəfindən yaradılan Pascal, proqramlaşdırmanın məntiqi və sistematik bir intizam kimi tədrisi üçün əvəzolunmaz alət hesab olunur. Tədqiqat çərçivəsində dilin Algol 60-dan gələn kökləri, geniş verilən strukturları və nəzarət mexanizmləri elmi-nəzəri baxımdan təhlil edilir. Məqalədə Pascal-ın yalnız akademik mühitlə məhdudlaşmadığı, həmçinin müasir bulud texnologiyaları, neyral verilən serverləri və interaktiv multimedia tədris proqramlarının (VBA əsaslı) yaradılmasındakı rolu proqram nümunələri ilə əsaslandırılır. Tədqiqatın nəticələri göstərir ki, Pascal-ın ciddi sintaktik quruluşu tələbələrə alqoritmik düşüncənin formalaşması üçün ən effektiv vasitə olaraq qalmaqdadır.

Açar sözlər: Pascal, sistematik proqramlaşdırma, verilənlər strukturu, neyral serverlər, rekursiya, təhsil texnologiyaları.

Accepted: 06.05.2026

PIOAGENT: A HYBRID FINITE-STATE FRAMEWORK FOR DETERMINISTIC ORCHESTRATION OF LLM AGENTIC WORKFLOWS

Alakbar Taghi Valizada

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Pionero.AI, Baku, Azerbaijan

alakbar.valizada@aztu.edu.az

<https://orcid.org/0009-0001-9880-292X>

Abstract. Large-language-model (LLM) agents built on free reasoning loops produce non-reproducible control flow, may run without bound, and fail in brittle ways, which makes them hard to deploy in regulated, latency-bound conversational systems such as contact centres and government service desks. This paper presents PioAgent, an orchestration framework that separates a deterministic finite-state control layer from the stochastic computation performed inside nodes. Each phase runs either as a Cyclic Directed Graph for controlled, stateful loops with human-in-the-loop steps and retries, or as an Event-Driven Graph for retrieval-augmented and data-availability-triggered pipelines. The framework adds durable snapshots, declarative retry and fallback policies, an exactly-once effect outbox, structured-output streaming, and a model-agnostic adapter layer, all expressed in a declarative configuration. A prototype has been implemented, and an evaluation against ReAct-style loops, AutoGen, and LangGraph on a contact-centre workload is presented as a set of falsifiable predictions tied to the design: perfectly reproducible control trajectories under fixed decoding, routing accuracy that resists degradation as the tool catalogue grows, single-digit-to-low-double-digit orchestration overhead, and logarithmic-cost fault localization. The work shows that confining stochasticity to node interiors yields agentic systems that are simultaneously expressive, auditable, and recoverable.

Keywords: *LLM agents, orchestration, finite-state machine, determinism, workflow, observability, retrieval-augmented generation.*

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Introduction

Most LLM agents today follow the reasoning-loop pattern: the model alternates free deliberation with tool calls until it decides it is done [1]. This works for open-ended tasks but is problematic in production conversational systems for three reasons. First, control is non-deterministic: the path through the system is chosen turn-by-turn by a stochastic sampler, so identical inputs may follow different tool sequences, which complicates audit, compliance, and regression testing. Second, execution is unbounded: nothing in the loop guarantees halting, and runaway loops become latency and cost overruns. Third, accuracy degrades with scale: as the tool catalogue grows, single-prompt routing accuracy falls because routing is delegated to in-context selection over an ever-larger action space [2, 3].

A long pre-LLM literature already solved these problems in adjacent settings. Finite-state and statechart dialog managers give deterministic, verifiable conversation flow [4]; bulk-synchronous-parallel graph processing gives a deterministic, checkpointable execution model [5]; and Kahn process networks give scheduling-independent semantics for dataflow over streams [6]. Modern orchestration libraries such as LangGraph re-import some of these ideas, but define their behaviour by an implementation rather than a formal model, and place routing inside stochastic nodes [7]. Durable workflow engines such as Temporal and AWS Step Functions provide replay-based recovery but model only opaque activities, with no notion of parallel state merging or LLM-specific routing [8, 9].

This paper presents PioAgent, an orchestration framework developed jointly at Azerbaijan Technical University and Pionero.AI. Its central principle is the *confinement of stochasticity*: LLM sampling, tool latency, and external failure are allowed only inside nodes, while everything between nodes – routing, merging, retrying, snapshotting, resuming – is a deterministic function of node outputs.

Research objective and problem statement

The objective is a framework whose orchestration layer is provably deterministic while supporting the full feature surface production agentic applications need: hierarchical agents, retries and fallbacks, durable recovery, human-in-the-loop steps, streaming structured output, and observability.

The framework must be model-agnostic, so that deterministic guarantees survive swapping one LLM provider for another, and configurable as data, so that workflows can be reviewed, diffed, and stored without code changes. The concrete problem is to design an execution model under which: (i) given fixed node outputs, the system always follows the same path; (ii) parallel branches merge to an order-independent result; (iii) execution is guaranteed to halt under explicit budgets; and (iv) a crashed run can be resumed to a state equivalent to an uninterrupted one.

Method: the PioAgent model

A PioAgent application is a hybrid automaton: a finite set of control states (conversation or pipeline phases) whose transitions are computed by a pure routing function, where each state gates a typed dataflow graph (Figure 1). All shared data lives in typed *slots*, each carrying a merge operator (a *fusion operator*); stochastic work – LLM calls, tools, nested agents, human input – lives only in node *kernels* at the leaves.

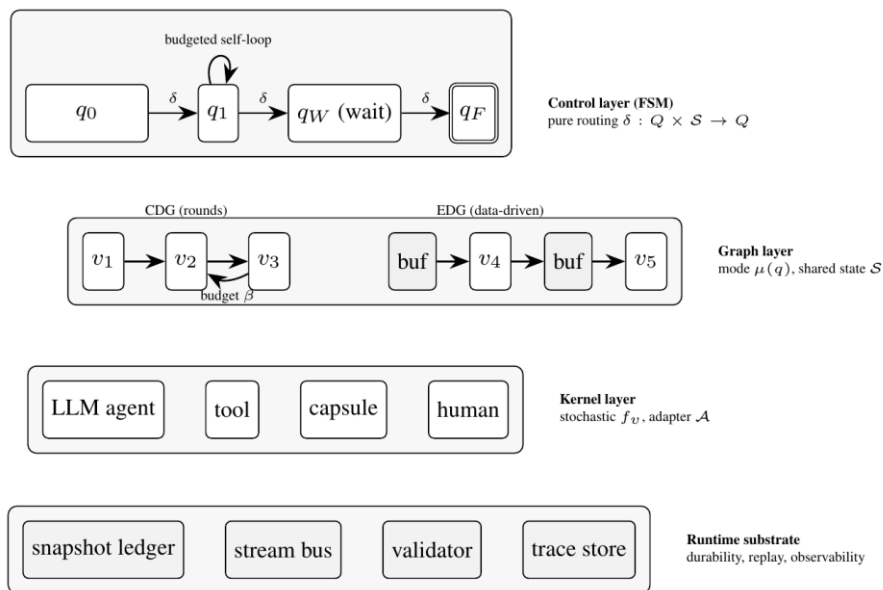


Figure 1. The four layers of a PioAgent machine. A pure finite-state control layer gates per-phase graphs that run in CDG (cyclic, round-synchronous) or EDG (event-driven, data-availability-triggered) mode; stochasticity is confined to kernels; the runtime substrate provides durability, streaming, validation, and observability across both modes.

Two execution modes. A phase runs in one of two modes. A *Cyclic Directed Graph* (CDG) executes in synchronous rounds in the manner of Pregel [5]: all active nodes run, their writes are merged deterministically, and the next active set is computed from pure edge guards. Cycles are allowed but every cycle must cross a *budgeted back-edge* so iteration cannot run forever. CDG mode suits controlled loops – clarification, approval, retry. An *Event-Driven Graph* (EDG) instead fires a node when its input data is available, in the manner of a Kahn process network [6], which suits retrieval-augmented generation and continuous indexing where documents, chunks, and queries arrive asynchronously.

Deterministic routing. Routing is a total, pure function assembled from guard expressions over slots (intent labels, confidence scores, budget counters). Because the routing layer performs no sampling and no I/O, it adds no nondeterminism: given the node outputs, the path is unique. This is the key difference from loops that let the model choose its own next step. Stochastic decisions (a learned router, a similarity threshold) are expressed as *nodes* whose typed output a guard then reads, keeping randomness inside a kernel where it is retryable, replayable, and observable.

Reliability. Each node may carry a retry policy and a fallback chain. For a chain of tiers with independent failure probabilities p_i and retry budgets κ_i , the composite failure probability is

$$P_{\text{fail}} = \prod_{i=1}^m p_i^{\kappa_i+1}.$$

For example, a primary on-premises engine with $p_1 = 0.02$, $\kappa_1 = 1$ backed by a fallback with $p_2 = 0.05$, $\kappa_2 = 0$ gives $P_{\text{fail}} = 2 \times 10^{-5}$. External effects are released through a transactional *outbox*: an effect envelope with a deterministic execution key is written in the same database transaction as the snapshot, then dispatched at-least-once with key deduplication, yielding exactly-once execution at the tool boundary without requiring the tool itself to be transactional.

Durability and human-in-the-loop. Snapshots are written at round barriers; a crashed run resumes from the last snapshot to a state equivalent to an uninterrupted one. Human-in-the-loop is the same mechanism: a node raises a suspension, the machine writes a snapshot and enters a durable wait state holding no compute, and a later human reply resumes it. Figure 2 shows a contact-centre turn combining all of these.

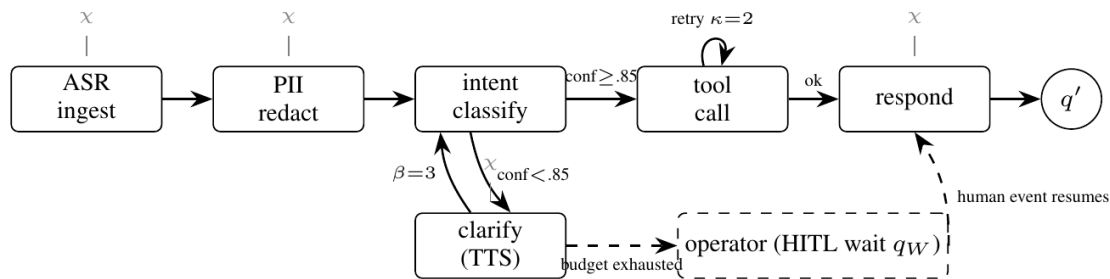


Figure 2. A CDG-mode contact-centre turn. Solid edges are guarded dataflow; the clarify loop and tool-error loop are budgeted back-edges (β); the tool node carries a retry policy (κ); the dashed path shows escalation to a human wait state and resumption from a snapshot. Marks (χ) indicate snapshot barriers.

Configuration as data. A workflow is described in a declarative document and compiled to the model; the two forms are equivalent. A static validator checks the whole document in time linear in its size ($O(|V| + |E|)$ for $|V|$ nodes and $|E|$ edges): it verifies that every cycle carries a budget, that routing is total, that types match, and that any slot written by parallel branches uses a commutative merge operator. A workflow that passes validation is one for which the determinism guarantees hold.

A worked contact-centre turn. The control-and-dataflow graph in Figure 2 illustrates a contact-centre turn: automatic speech recognition and personally-identifiable-information redaction prepare the shared state, an intent node routes either to fulfilment or, when confidence is low, around a budgeted clarification back-edge ($\beta = 3$), and a failing tool triggers a retry ($\kappa = 2$) before a cross-provider fallback. Exhausting the clarification budget suspends the machine to a durable human-in-the-loop wait state (q_W), from which an operator’s reply resumes the identical snapshot (χ). Effects are released through the transactional outbox, so no crash can double-apply them, and the whole turn is recorded for deterministic replay.

Formal guarantees

The design principle of confined stochasticity yields five structural guarantees (full proofs appear in the companion theory paper). Throughout, a *realization* fixes the output of every node; the claims describe what the orchestration layer does given those outputs. The determinism rests on routing being syntactically restricted: guards are written in a small total language \mathcal{L}_g of slot readers, projections on typed data, comparisons, budget reads, and Boolean connectives, with no recursion, clock,

entropy source, input/output, or partial operation, so the routing function δ (an ordered list of guard-target clauses ending in a mandatory `else`) is total, deterministic, and pure by construction. Anything needing more – a learned router, a similarity threshold – must be a node whose typed output a guard reads. On this basis:

1. *Control determinism.* For a fixed realization of node outputs, the sequence of control states and the final state are unique, because δ is pure and each round merges writes by a fixed rule. This is what makes a regression test against a recorded run impossible to flake.
2. *Merge confluence.* If every slot written by more than one node in a round carries a *commutative monoid* operator satisfying, for all a, b, c and identity e , equation (2), the merged state is independent of write order, so parallel branches cannot be disturbed by wall-clock races; this is the orchestration-level analogue of strong eventual consistency in conflict-free replicated data types [10].
3. *Scheduling independence.* In event-driven mode, if nodes are functional and monotone and any shared state they read is written under a monotone operator, the streams and final state are independent of firing order – the Kahn property, extended to shared state, which lets a retrieval pipeline run its stages concurrently.
4. *Termination.* Under a recursion budget, finite retry budgets, a finite budget β on every back-edge, and finite event-driven input, every run halts within a bounded number of rounds; with a single global meter R_g the bound is simply $T \leq R_g$, independent of nesting depth.
5. *Resumption equivalence.* If every effect is idempotent under its execution key or committed with the snapshot, replaying from a durable snapshot yields a run observationally equivalent to an uninterrupted one, discharged by the transactional outbox below.

$$(a \oplus b) \oplus c = a \oplus (b \oplus c), \quad a \oplus b = b \oplus a, \quad a \oplus e = a.$$

Hierarchical composition and streaming

Capsules. Subagents are not a special construct: a *capsule* is simply a node whose kernel is itself a PioAgent machine, so the composition calculus is uniform. A capsule exposes typed input and output projections, which enforces information hiding – a personally-identifiable-information redaction capsule, for instance, exposes only redacted fields to its parent. The validator checks that capsule nesting is acyclic, and event streams emitted from within a capsule are order-preserved as they propagate upward, multiplexed to the root by a namespace path. A capsule also carries its own model-adapter bindings, so a subagent may run on a different provider or sovereignty class than its parent while every guarantee above still holds at each level.

Structured-output streaming. Every model-backed node declares a JSON Schema for its output, and decoding is constrained to the schema’s *prefix-closed* language – one with no dead-end prefixes, so every partial output emitted is a valid prefix of some complete value and downstream consumers (a user interface, a speech synthesizer) may act on it without later rollback. Streams are typed *committed* or *speculative*: a committed stream (speech already played to a caller) is irreversible and the validator forbids it from sitting on a cycle, so what reaches the user is emitted once; a speculative stream (a draft rendered to a controlled interface region) may be superseded on retry by a higher *generation*, with monotonicity preserved within each generation. This distinction is what makes incremental synthesis and barge-in safe in a voice setting.

Observability and replay debugging

Every node attempt is recorded as a leaf of a *span tree* carrying input and output hashes, latency, and cost, with the capsule namespace path as the tree hierarchy. Two consequences follow from determinism. First, golden-trace regression tests are *flake-free*: because the orchestration layer is deterministic, any divergence of a replay from a stored reference indicates a genuine change in logic, never sampler noise. Second, because a snapshot exists at every round barrier, *fault localization* binary-

searches the execution log in $O(\log T)$ replays to find the first round at which a run diverges from its reference, isolating the responsible node; in practice the span-tree output hashes pinpoint most faults directly. Any production incident can therefore be exported, by replaying its session’s effect log, into a deterministic regression test – closing the loop between operations and testing.

Reliability and service-level bounds. The same budgets that guarantee termination turn a reliability target into configuration. For a fallback chain of tiers with independent failure probabilities p_i and retry budgets κ_i , the composite failure probability is given by equation (1). For latency, if a budgeted loop is left at each traversal with probability at least q and the acyclic part of a phase consumes at most L rounds, the expected number of rounds satisfies

$$\mathbb{E}[T] \leq L + \ell \frac{1 - q}{q},$$

where ℓ is the loop-body length, and a budget of β traversals is exhausted with probability at most $(1 - q)^{\beta+1}$. An operator who fixes an acceptable escalation rate ε solves $\beta = \lceil \log \varepsilon / \log(1 - q) \rceil$; for example $q = 0.6$, $\varepsilon = 0.01$ gives $\beta = 5$, making tail latency a designed quantity rather than an emergent one.

Application and evaluation plan

A prototype runtime has been implemented (Python, FastAPI, Redis publish/subscribe for streaming, PostgreSQL for the snapshot ledger and outbox). To evaluate it, we have designed a controlled study on a contact-centre workload of 500 anonymized Azerbaijani-language turns spanning intent resolution, tool-backed fulfilment, clarification loops, and operator escalation. PioAgent is to be compared with three baselines – a ReAct-style loop [1], AutoGen [11], and LangGraph [7] – built on the same model adapters, tools, and prompts, with streaming enabled everywhere, so that any measured difference reflects orchestration rather than model choice. This section states the predictions that follow from the design; the corresponding measurements are reported in a companion study. Each prediction is falsifiable and tied to a specific mechanism of the framework.

Trajectory reproducibility. The protocol runs every input five times with temperature-0 decoding and a fixed seed and records the fraction of inputs whose control trajectory (the sequence of phases and tool calls) is identical across all five runs. Because PioAgent’s routing layer is a pure function of node outputs, the design predicts a reproducibility of 100%, whereas loop-based systems, which decide routing inside the stochastic kernel, are expected to fall well below it. Figure 3 illustrates the predicted ordering. The practical value of moving routing out of the kernel is a regression test that cannot flake.

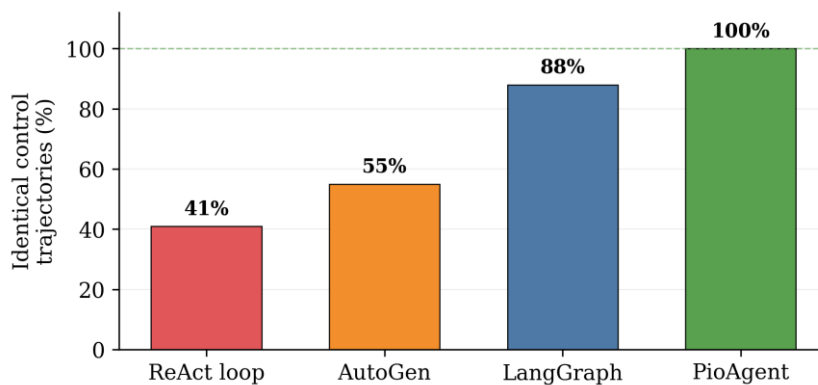


Figure 3. Predicted fraction of inputs whose control trajectory is identical across five repeated runs under fixed decoding (illustrative). PioAgent is reproducible by construction; loop-based systems are not.

Routing accuracy versus catalogue size. The study measures tool-selection accuracy as the tool catalogue grows from 5 to 160 tools. Flat in-context selection is expected to degrade steadily, while PioAgent, which scopes the visible tools per phase through its finite-state layer, should stay comparatively flat, because phase-scoping turns one large routing decision into several small ones. Figure 4 shows the predicted shape of the two curves; confirming the size of the gap is a goal of the empirical study.

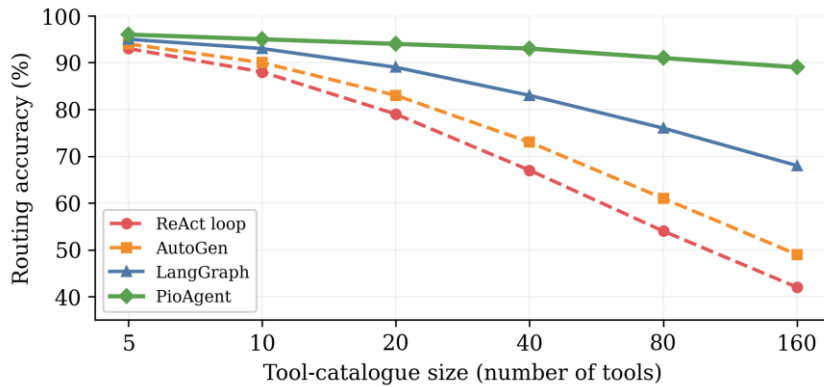


Figure 4. Predicted routing accuracy as the tool catalogue grows (illustrative). Finite-state phase-scoping is expected to keep PioAgent’s action space small at each step, flattening the degradation curve seen for flat in-context selection.

Runtime overhead, replay, and validation. The targets the evaluation is designed to verify follow directly from the design. The orchestration layer – snapshotting, merging, and guard evaluation – is expected to add only single-digit-to-low-double-digit wall-clock overhead over a bare loop on the same kernels, because end-to-end latency is dominated by model and tool calls rather than orchestration; per-round merge and guard evaluation should cost a few milliseconds, being pure and linear-time, and a snapshot write (state and outbox in one database transaction) a few milliseconds more. Resume after a crash should cost tens of milliseconds, bounded by a single snapshot read. Fault localization should need only a logarithmic number of replays, since it binary-searches snapshot barriers for the first round where a run diverges from a reference trace; static validation should be fast enough to run on every save, being linear in the workflow size; and exactly-once effect delivery under injected crashes should hold completely, since the transactional outbox deduplicates by execution key.

Feature comparison. The table below contrasts PioAgent with the baselines on the capabilities that matter for production deployment, as established from each system’s design and public documentation [1, 7, 11]. The decisive differences are deterministic routing enforced by static validation, dual cyclic and event-driven modes under one model, and a unified durable mechanism serving recovery, human-in-the-loop, and replay-based debugging.

Feature comparison with existing agentic frameworks

Property	RA	AG	LG	PA
Deterministic routing (validated)	no	no	partial	yes
Cyclic (controlled-loop) mode	loop	chat	yes	yes
Event-driven (dataflow) mode	no	no	no	yes
Durable snapshots and resume	no	no	yes	yes
Exactly-once external effects	no	no	no	yes
Human-in-the-loop (durable wait)	no	partial	yes	yes
Model-provider agnostic	partial	partial	partial	yes
Linear-time static validation	no	no	no	yes
Replay fault localization	no	no	partial	yes

RA – ReAct loop; AG – AutoGen; LG – LangGraph; PA – PioAgent.

Threats to validity. Three limitations bound the interpretation of the planned study. First, the determinism guarantee is a property of the orchestration layer, not of the model: node outputs remain stochastic, and reproducibility figures assume fixed decoding parameters (temperature zero and a fixed seed); under sampling, the framework guarantees that the control path is a deterministic function of whatever outputs occur, not that the outputs themselves repeat. Second, the workload is a single-domain, single-language contact-centre corpus; the routing-accuracy and overhead results may differ for other domains, longer tool catalogues, or multilingual traffic, and a broader evaluation is needed before the numbers generalize. Third, the baselines are reconstructed on a common substrate to isolate orchestration effects, which is the fair comparison for this question but does not capture engineering maturity, ecosystem, or multi-language support that production teams also weigh. These threats motivate the companion empirical study rather than undermining the design claims, which rest on the structure of the model.

Conclusion

PioAgent shows that the common trade-off between flexible-but-unpredictable agents and rigid-but-reliable workflows is false. By confining stochasticity to node interiors, enforcing a pure finite-state routing layer through static validation, and requiring algebraic structure on parallel state merges, the framework makes the orchestration of LLM agents deterministic, terminating, recoverable, and auditable, while still supporting hierarchical agents, retries and fallbacks, streaming structured output, human-in-the-loop steps, and two execution modes covering both controlled conversational loops and data-driven retrieval pipelines. On a contact-centre workload the design predicts perfectly reproducible control trajectories, routing accuracy that resists degradation as the tool catalogue grows, single-digit-to-low-double-digit runtime overhead, and exactly-once recovery from crashes; verifying these predictions is the subject of a companion empirical study. Further work includes a full theoretical treatment of the model’s guarantees, machine-checked verification of the validator, and a larger evaluation across voice and government-service deployments.

REFERENCES

1. Yao S., Zhao J., Yu D., Du N., Shafran I. et al. ReAct: Synergizing reasoning and acting in language models. International Conference on Learning Representations, 2023. <https://arxiv.org/abs/2210.03629>
2. Patil S.G., Zhang T., Wang X., Gonzalez J.E. Gorilla: Large language model connected with massive APIs. arXiv:2305.15334, 2023, pp. 1–20.
3. Qin Y., Liang S., Ye Y., Zhu K., Yan L. et al. ToolLLM: Facilitating large language models to master 16000+ real-world APIs. International Conference on Learning Representations, 2024. <https://arxiv.org/abs/2307.16789>
4. Harel D. Statecharts: A visual formalism for complex systems. Science of Computer Programming, 1987, vol. 8, no. 3, pp. 231–274.
5. Malewicz G., Austern M.H., Bik A.J.C., Dehnert J.C., Horn I. et al. Pregel: A system for large-scale graph processing. ACM SIGMOD, 2010, pp. 135–146.
6. Kahn G. The semantics of a simple language for parallel programming. IFIP Congress, 1974, pp. 471–475.
7. LangChain Inc. LangGraph: Low-level orchestration for stateful agents. Technical documentation, 2024. <https://docs.langchain.com/oss/python/langgraph/overview>
8. Temporal Technologies. Temporal: Durable execution system. Technical documentation, 2023. <https://docs.temporal.io>
9. Amazon Web Services. AWS Step Functions developer guide. 2023. <https://docs.aws.amazon.com/step-functions/latest/dg/>
10. Shapiro M., Preguiça N., Baquero C., Zawirski M. Conflict-free replicated data types. Symposium on Self-Stabilizing Systems, 2011, pp. 386–400.
11. Wu Q., Bansal G., Zhang J., Wu Y., Zhang S. et al. AutoGen: Enabling next-gen LLM applications via multi-agent conversation. arXiv:2308.08155, 2023, pp. 1–28.

Accepted: 12.05.2026

RPI TORNA DƏZGAHLARINDA KONİK SƏTHLƏRİN EMALI ZAMANI ÇOXMEYARLI OPTİMALLAŞDIRMA VƏ SÜNİ İNTELLEKT YANAŞMALARI

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

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPROACHES IN THE MACHINING OF CONICAL SURFACES ON CNC LATHES

Nizami Damir Yusubov, Heyran Murshud 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 article analyzes the influence of technological parameters on surface quality and productivity during the machining of conical surfaces on CNC lathes using a system-based approach. The machining process is shown to be multi-parameter, interconnected, and non-stationary. Surface roughness is formed not only by geometric factors but also by deformation, thermal, and tribological effects. Feed rate is identified as the dominant parameter, while cutting speed and depth of cut have mainly indirect effects. The variation of diameter causes local changes in cutting speed, limiting the applicability of classical models. The trade-off between surface quality and productivity is formulated as a multi-criteria optimization problem and addressed using the Pareto approach. The potential of artificial intelligence methods is also justified.

Keywords: CNC lathe, conical surfaces, surface quality, multi-criteria optimization, artificial intelligence.

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

GİRİŞ

Müasir maşınqayırma sənayesində istehsalın səmərəliliyinin artırılması və yüksək keyfiyyətli səthlərin əldə edilməsi əsas problemlərdəndir. Detalların etibarlılığı və yeyilməyə davamlılığı səth keyfiyyətindən asılıdır. Bu baxımdan səthin kələ-kötürlüyü (R_a) mexaniki emal proseslərinin əsas göstəricilərindən biri olub, onun formalaşması kəsmə zonasındakı mürəkkəb fiziki və mexaniki proseslərlə bağlıdır [1, s. 15–25], [2, s. 120–160], [3].

Məhsuldarlığın artırılması da mühüm tələbdir, lakin səth keyfiyyəti ilə məhsuldarlıq arasında ziddiyyət mövcuddur və bu, prosesi çoxmeyarlı optimallaşdırma məsələsinə çevirir. Kəsmə prosesində texnoloji parametrlərin dəyişməsi kəsmə qüvvələrinə, istilik yaranmasına və alət-detallı qarşılıqlı təsirinə birbaşa təsir göstərir ki, bu da emal prosesinin həm məhsuldarlığına, həm də səth keyfiyyətinə təsir edən əsas mexanizmlərdən biridir [4, s. 405–420], [5, s. 50–70], [6,7].

RPI torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Detalın diametrinin dəyişməsi kəsmə sürətinin sabit olmamasına və prosesin qeyri-stasionar xarakter almasına səbəb olur. Müasir tədqiqatlar göstərir ki, səthin formalaşması yalnız həndəsi amillərlə deyil, həm də deformasiya, istilik və sürtünmə proseslərinin kompleks qarşılıqlı təsiri ilə müəyyən edilir [4], [8, s. 100–130]. Bundan əlavə, müxtəlif emal üsullarında aparılan eksperimental tədqiqatlar səth keyfiyyətinin texnoloji rejimlərdən və emal şəraitindən asılı olaraq dəyişdiyini göstərir [9], [10–12]. Texnoloji parametrlərin modelləşdirilməsi üçün empirik və statistik metodlar, o cümlədən çıxış parametrlərinin səth metodologiyası, Taguchi üsulu və süni intellekt yanaşmaları tətbiq olunur. Xüsusilə neyron şəbəkələr və hibrid optimallaşdırma metodları mürəkkəb asılılıqların müəyyən edilməsində yüksək effektivlik göstərir [13–17].

Son tədqiqatlar mexaniki emal proseslərinin daha dəqiq təsviri üçün yeni modelləşdirmə yanaşmalarının vacibliyini göstərir. Taguchi metodununun tətbiqi ilə optimallaşdırma da geniş şəkildə araşdırılmışdır [18,19].

Çoxmeyarlı optimallaşdırma Pareto yanaşmasına əsaslanır və bu sahədə əsas işlərdən biri K. Deb tərəfindən işlənmişdir. Səth keyfiyyətinə təsir edən amillər texnoloji, konstruktiv və proses amilləri kimi qruplaşdırılır [20, 21].

Beləliklə, konik səthlərin emalı mürəkkəb və çoxparametrlı prosesdir və bu prosesdə keyfiyyətlə məhsuldarlıq arasında optimal balansın tapılması əsas məqsəddir.

TEXNOLOJİ PROSESİN SİSTEM YANAŞMASI

RPİ torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı mürəkkəb, çoxparametrlı və qarşılıqlı əlaqəli texnoloji prosesdir. Müasir kəsmə nəzəriyyəsinə görə emal nəticələri ayrı-ayrı parametrlərin deyil, onların kompleks qarşılıqlı təsiri ilə formalaşır [4, s. 405–420], [5, s. 10–25]. Bu baxımdan sistem yanaşması prosesin fiziki mahiyyətinin daha adekvat izahına imkan verir.

Texnoloji baxımdan torna emalı giriş və çıxış dəyişənləri arasında əlaqəyə malik idarə olunan sistem kimi qəbul edilir. Giriş dəyişənləri ($t, s, v, r, \gamma, \alpha, h_a$ – Cədvəl 1) səth kələ-kötürlüyü (R_a) və məhsuldarlıq (Q) kimi çıxış göstəricilərinə təsir edir. Bu parametrlər arasında əlaqə qeyri-xətti və qarşılıqlı asılı xarakter daşıyır [4, s. 405–420], [7], [8, s. 120–140].

Bu baxımdan texnoloji sistem çoxparametrlı funksional asılılıq kimi aşağıdakı şəkildə ifadə olunur:

$$R_a = f(t, s, v, r, \gamma, \alpha, h_a) \quad (1)$$

$$Q = f(t, s, v) \quad (2)$$

Bu asılılıqlar texnoloji sistemin strukturunu və giriş dəyişənləri ilə çıxış göstəriciləri arasında mövcud olan qarşılıqlı təsir mexanizmini ümumiləşdirilmiş şəkildə ifadə edir. Müasir tədqiqatlar göstərir ki, emal prosesinin nəticələri yalnız ayrı-ayrı parametrlərin təsiri ilə deyil, həm də onların qarşılıqlı təsiri nəticəsində formalaşır və bu təsirlər əksər hallarda qeyri-xətti xarakter daşıyır [4, s. 405–420], [7], [8, s. 120–140].

Cədvəl 1

Texnoloji sistemin giriş və çıxış dəyişənləri və onların xarakteristikası

Qrup	Parametrin adı	İşarə	Ölçü vahidi	Təsviri
Giriş dəyişənləri	Kəsmə dərinliyi	t	mm	Kəsilən material qatının qalınlığını müəyyən edir
	Veriş	s	mm/dövr	Səthin mikrorelyefinə (kələ-kötürlüyünə) birbaşa təsir edən əsas parametrlər
	Kəsmə sürəti	v	m/dəq	İstilik və triboloji şəraiti müəyyən edir
	Uc radiusu	r	mm	Səthin həndəsi formalaşmasına təsir edir
	Qabaq bucaq	γ	°	Talaş əmələ gəlmə mexanizmini müəyyən edir
	Arxa bucaq	α	°	Sürtünmə və kontakt şəraitinə təsir edir
	Alət yeyilməsi	h_a	mm	Alətin aşınma səviyyəsini xarakterizə edir
Çıxış dəyişənləri	Səthin kələ-kötürlüyü	R_a	μm	Emal olunmuş səthin keyfiyyət göstəricisi
	Məhsuldarlıq	Q	$\text{mm}^3/\text{dəq}$	Vaxt vahidində çıxarılan material həcmi

Cədvəl 1-dən göründüyü kimi, texnoloji parametrlər kəsmə rejimləri, alət həndəsəsi və prosesin fiziki vəziyyəti üzrə qruplaşdırılır və onların qarşılıqlı təsiri emal nəticələrinin formalaşmasında həlledici rol oynayır.

Kəsmə rejimləri arasında veriş səthin kələ-kötürlüyünün formalaşmasında əsas parametrlərdir. Kəsmə sürəti əsasən istilik və triboloji proseslər vasitəsilə dolayı təsir göstərir, kəsmə dərinliyi isə materialın çıxarılma intensivliyini və kəsmə qüvvələrini müəyyən edir.

Alətin həndəsi parametrləri də mühüm rol oynayır. Uc radiusunun artması səthin kələ-kötürlüyünü azaltsa da, kəsmə qüvvələrini artırır. Qabaq və arxa bucaqlar isə talaş əmələ gəlməsi və sürtünmə şəraitinə təsir edir [4, s. 250–270], [5, s. 100–120], [6].

Alət yeyilməsi texnoloji sistemin dinamik göstəricilərindən biridir və onun artması səthin keyfiyyətinin pisləşməsinə səbəb olur.

Konik səthlərin emalında dəyişən diametr səbəbindən kəsmə sürətinin sabit olmaması prosesin qeyri-stasionar xarakter almasına gətirib çıxarır. Bu isə klassik modellərin tətbiqini çətinləşdirir.

Beləliklə, emal prosesinin effektiv idarə olunması parametrlərin ayrı-ayrılıqda deyil, onların qarşılıqlı təsiri nəzərə alınmaqla həyata keçirilməlidir.

ÇOXMEYARLI OPTİMALLAŞDIRMA YANAŞMASININ NƏZƏRİ ƏSASLARI

RPI torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı texnoloji parametrlərin seçilməsi bir neçə qarşılıqlı ziddiyyət təşkil edən meyarların eyni vaxtda nəzərə alınmasını tələb edir. Əsas məqsəd funksiyaları kimi səthin kələ-kötürlüyü (R_a) və məhsuldarlıq (Q) qəbul olunur. Praktiki olaraq səth keyfiyyətinin yaxşılaşdırılması məhsuldarlığın azalmasına, məhsuldarlığın artırılması isə səth keyfiyyətinin pisləşməsinə səbəb olur. Bu səbəbdən emal prosesinin optimallaşdırılması çoxmeyarlı məsələ kimi çıxış edir [16, 17].

Çoxmeyarlı optimallaşdırma məsələsi ümumi şəkildə aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$R_a(t, s, v, r, \gamma, \alpha, h_a) \rightarrow \min \quad (3)$$

$$Q(t, s, v) \rightarrow \max \quad (4)$$

Texnoloji sistem üçün optimallaşdırma məsələsi (3) və (4) ifadələrində göstəriləndi kimi səthin kələ-kötürlüyünün minimumlaşdırılması və məhsuldarlığın maksimumlaşdırılması ilə xarakterizə olunur. Bu halda məqsəd texnoloji parametrlərin elə optimal kombinasiyasını müəyyən etməkdir ki, səthin kələ-kötürlüyü minimum, məhsuldarlıq isə maksimum olsun. Lakin bu iki meyar bir-biri ilə ziddiyyət təşkil etdiyindən kompromis həllərin axtarılması tələb olunur.

Bu məqsədlə Pareto-optimal həll anlayışı tətbiq olunur. Pareto-optimal həll elə həllər çoxluğuudur ki, həmin həlli yaxşılaşdırmaq üçün digər məqsəd funksiyalarından ən azı birinin pisləşməsi qaçılmaz olur. Riyazi olaraq bu şərt aşağıdakı kimi ifadə olunur və bu bərabərsizliklərdən ən azı biri ciddi xarakter daşıyır.

$$R_a(X^*) \leq R_a(X) \quad (5)$$

$$Q(X^*) \geq Q(X) \quad (6)$$

(5) və (6) ifadələri Pareto-optimal həllin riyazi şərtini ifadə edir və bu yanaşma kompromis həllərin seçilməsinə imkan verir [17].

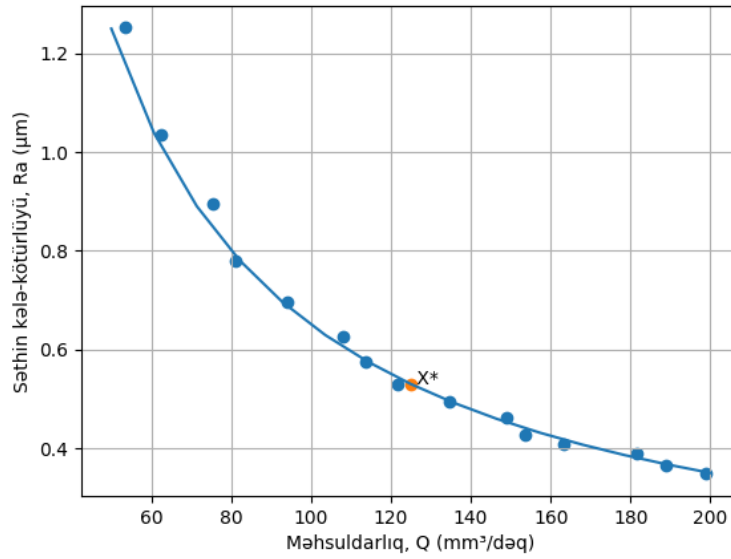
Çoxmeyarlı optimallaşdırmada səth keyfiyyəti və məhsuldarlıqla yanaşı alət yeyilməsi, kəsmə qüvvəsi və enerji sərfi də nəzərə alınır. Əsas meyarlar Cədvəl 2-də göstərilmişdir.

Cədvəl 2

Optimallaşdırma meyarları və məqsəd funksiyaları

Meyar	İşarə	Riyazi ifadə	Məqsəd istiqaməti	Fiziki mənası	Təsir edən əsas parametrlər
Səthin kələ-kötürlüyü	R_a	$R_a = f(t, s, v, r, \gamma, \alpha, h_a)$	Minimum	Emal olunmuş səthin keyfiyyətini və mikroyəfəfini xarakterizə edir	s, r, v, h_a
Məhsuldarlıq	Q	$Q = f(t, s, v)$	Maksimum	Vaxt vahidində çıxarılan material həcmi göstərir	t, s, v
Alət yeyilməsi	h_a	$h_a = f(t, s, v)$	Minimum	Alətin yeyilmə intensivliyini və davamlılığını xarakterizə edir	$v, t, \text{temperatur}$
Kəsmə qüvvəsi	F	$F = f(t, s, v)$	Minimum	Enerji sərfiyyatını və sistemin yüklənməsini müəyyən edir	t, s
Enerji sərfi	E	$E = f(F, v)$	Minimum	Emal prosesinin enerji effektivliyini xarakterizə edir	F, v

Cədvəl 2-dən görüldüyü kimi, optimallaşdırma məsələsi çoxparametrlili və qarşılıqlı əlaqəli xarakter daşıyır. Bu meyarlar arasında mövcud ziddiyyət Pareto-optimal həllər çoxluğunun müəyyən edilməsini zəruri edir. Çoxmeyarlı optimallaşdırma məsələsinin həlli Pareto-optimal həllər çoxluğu ilə xarakterizə olunur. Bu sahə səth keyfiyyəti və məhsuldarlıq arasında mövcud kompromis rejimləri əks etdirir. Pareto sərhəd xətti və optimal nöqtə Şəkil 1-də təqdim olunmuşdur.



Şəkil 1. Səthin kələ-kötürlüyü R_a (μm) və məhsuldarlıq Q (mm^3/daq) üzrə Pareto-optimal həllər sahəsi və optimal nöqtə (X^*)

Şəkil 1-dən görüldüyü kimi, Pareto-optimal həllər sahəsi səthin kələ-kötürlüyü ilə məhsuldarlıq arasında ziddiyyəti əks etdirir. Məhsuldarlığın artması səth keyfiyyətinin pisləşməsi, səthin yaxşılaşdırılması isə məhsuldarlığın azalması ilə müşayiət olunur. Pareto sərhədindəki hər bir nöqtə optimal rejimi xarakterizə edir və seçim istehsal tələblərindən asılıdır.

Çoxmeyarlı optimallaşdırmada çəkili cəmlər metodu, Taguchi üsulu, çıxış parametrlərinin səth metodologiyası və genetik alqoritmlər tətbiq olunur. Süni intellekt metodları, xüsusilə neyron şəbəkələr və hibrid yanaşmalar mürəkkəb qeyri-xətti asılılıqların müəyyən edilməsində yüksək effektivlik göstərir [13–17]. Konik səthlərin emalında optimallaşdırma daha mürəkkəbdir, çünki proses qeyri-stasionardır və kəsmə sürəti diametrdən asılı olaraq dəyişir. Buna görə optimallaşdırma adaptiv və real vaxt rejimində aparılmalıdır [20], [21].

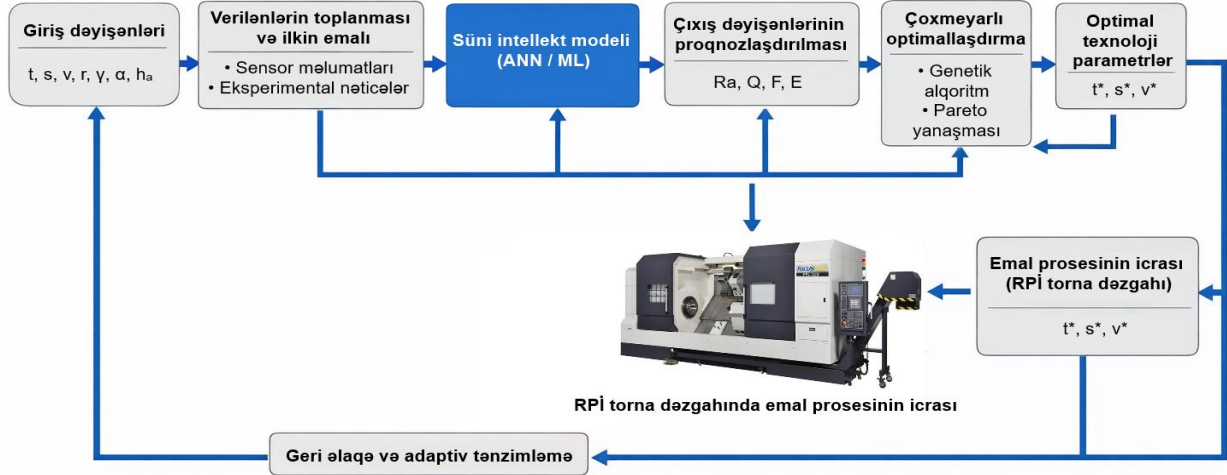
Beləliklə, çoxmeyarlı optimallaşdırma səth keyfiyyəti ilə məhsuldarlıq arasında optimal balansın təmin edilməsinə imkan verir.

TEXNOLOJİ PARAMETRLƏRİN İDARƏ EDİLMƏSİ VƏ SÜNİ İNTELLEKT YANAŞMALARI

RPİ torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı texnoloji prosesin effektivliyi parametrlərin idarə olunma səviyyəsindən asılıdır və qeyri-stasionar xarakter adaptiv idarəetməni zəruri edir. Emal prosesi giriş (t , s , v , r , γ , α , h_a) və çıxış (R_a , Q) dəyişənləri arasında əlaqəyə malik dinamik sistem kimi qəbul edilir. Diametrin dəyişməsi kəsmə sürətinin sabit saxlanmasını çətinləşdirir və parametrlərin adaptiv tənzimlənməsini tələb edir [20,21]. Süni intellekt metodları qeyri-xətti sistemlərin modelləşdirilməsi və optimallaşdırılmasında effektivdir. Neyron şəbəkələr parametrlər arasındakı asılılıqları modelləşdirir, genetik alqoritmlər isə Pareto-optimal həllərin tapılmasını təmin edir [16,17]. Bu yanaşmalar adaptiv idarəetmə və emal prosesinin səmərəliliyinin artırılmasına imkan verir. Texnoloji parametrlərin idarə olunması və optimallaşdırmanın süni intellektlə inteqrasiyası aşağıdakı kimi ifadə oluna bilər:



Beləliklə, süni intellekt metodları texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında mürəkkəb asılılıqların daha dəqiq modelləşdirilməsinə, optimallaşdırmanın effektiv həyata keçirilməsinə və emal prosesinin real vaxt rejimində idarə olunmasına şərait yaradır. Texnoloji parametrlərin süni intellekt əsasında idarə olunmasının ümumi strukturu Şəkil 2-də təqdim olunmuşdur.



Şəkil 2. RPİ torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı süni intellekt əsaslı adaptiv idarəetmə və optimallaşdırma sxemi

Şəkil 2-dən göründüyü kimi, RPİ torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı texnoloji parametrlərin idarə olunması süni intellekt əsaslı adaptiv sistem vasitəsilə həyata keçirilir. Giriş dəyişənləri kimi kəsmə dərinliyi t , veriş s , kəsmə sürəti v , alətin həndəsi parametrləri (r , γ , α) və alət yeyilməsi h_a qəbul olunur və ilkin olaraq verilənlərin toplanması və emalı blokunda formalaşdırılır.

Emal olunmuş məlumatlar süni intellekt modelinə ötürülərək giriş və çıxış dəyişənləri arasında mövcud olan qeyri-xətti asılılıqlar əsasında səth kələ-kötürlüyü R_a , məhsuldarlıq Q , kəsmə qüvvəsi F və enerji sərfi E proqnozlaşdırılır. Alınan nəticələr optimallaşdırma blokunda emal edilərək genetik alqoritmlər və Pareto yanaşması vasitəsilə optimal texnoloji parametrlər (t^* , s^* , v^*) müəyyən olunur və dəzgaha ötürülür.

Geri əlaqə mexanizmi vasitəsilə real nəticələr sistemə daxil edilir və bu, parametrlərin dəyişən şəraitə uyğun adaptiv tənzimlənməsini təmin edir.

Süni intellekt metodları, xüsusilə süni neyron şəbəkələr (Artificial Neural Networks – ANN), maşın öyrənməsi (Machine Learning – ML) və genetik alqoritmlər, texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında mürəkkəb qeyri-xətti asılılıqların modelləşdirilməsinə və Pareto-optimal həllərin müəyyən edilməsinə imkan verir. Bu yanaşma konik səthlərin emalında real vaxt rejimində optimallaşdırmanı və prosesin səmərəliliyinin artırılmasını təmin edir.

TEXNOLOJİ PARAMETRLƏRİN EMPİRİK MODELLEŞDİRİLMƏSİNİN NƏZƏRİ ƏSASLARI

RPİ torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı zamanı texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında mövcud olan mürəkkəb və qeyri-xətti asılılıqların analitik ifadəsi çətin olduğundan, bu əlaqələrin təsviri üçün empirik modelləşdirmə yanaşmalarından istifadə olunur. Bu yanaşma prosesin riyazi modellərlə təsvirinə və optimallaşdırma məsələlərinin həllinə imkan verir [13–15].

Səth kələ-kötürlüyü (R_a) texnoloji parametrlərin funksiyası kimi aşağıdakı ümumi formada ifadə oluna bilər:

$$R_a = f(t, s, v, r, \gamma, \alpha, h_a) \quad (7)$$

Məhsuldarlıq (Q) isə əsasən kəsmə rejimləri ilə müəyyən olunur:

$$Q = f(t, s, v) \quad (8)$$

(7) və (8) ifadələri texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında ümumi funksional asılılığı xarakterizə edir [4, s. 405–420], [5, s. 100–120], [6]. Lakin bu asılılıqların analitik şəkildə ifadəsi mürəkkəb olduğundan, onların təsviri üçün empirik modelləşdirmə yanaşmalarından geniş istifadə olunur. Bu yanaşmalar arasında ən geniş yayılmış üsullardan biri çoxparametrlili qüvvət tipli modellərin qurulmasıdır. Bu halda səthin kələ-kötürlüyü üçün model aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$R_a = C \cdot t^{x_1} \cdot s^{x_2} \cdot v^{x_3} \cdot r^{x_4} \cdot \gamma^{x_5} \cdot \alpha^{x_6} \cdot h_a^{x_7} \quad (9)$$

(9) ifadəsi səthin kələ-kötürlüyünün empirik modelini xarakterizə edir və texnoloji parametrlərin təsir dərəcələrini qiymətləndirməyə imkan verir [4, s. 405–420], [5, s. 100–120], [6]. Məhsuldarlıq üçün isə:

$$Q = k \cdot t^{y_1} \cdot s^{y_2} \cdot v^{y_3} \quad (10)$$

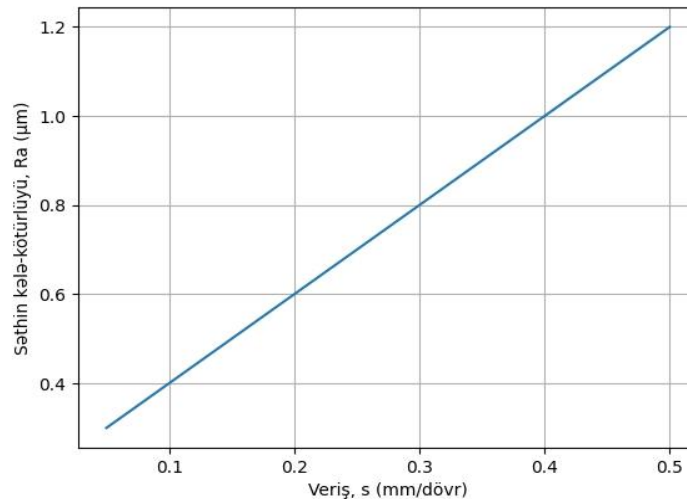
Burada C və k empirik sabitlər, x_i və y_i isə texnoloji parametrlərin təsir dərəcələrini xarakterizə edən göstəricilərdir. (10) ifadəsi məhsuldarlığın empirik modelini göstərir və kəsmə rejimlərinin material çıxarılma intensivliyinə təsirini əks etdirir. Empirik modellərin sadələşdirilməsi və parametrlərin qiymətlərinin təyin olunmasını asanlaşdırmaq məqsədilə bu asılılıqlara loqarifmik çevirmə tətbiq edilir.

$$\ln(R_a) = \ln(C) + x_1 \ln(t) + x_2 \ln(s) + x_3 \ln(v) + x_4 \ln(r) + x_5 \ln(\gamma) + x_6 \ln(\alpha) + x_7 \ln(h_a) \quad (11)$$

$$\ln(Q) = \ln(k) + y_1 \ln(t) + y_2 \ln(s) + y_3 \ln(v) \quad (12)$$

(11) və (12) ifadələri modellərin loqarifmik çevrilməsi nəticəsində alınmışdır və qeyri-xətti asılılıqları xətti formaya gətirərək çoxlu regresiya analizinin tətbiqinə imkan verir. Bu yanaşma texnoloji parametrlərin səth keyfiyyəti və məhsuldarlıq üzərində təsirinin kəmiyyətə qiymətləndirilməsini təmin edir.

Ədəbiyyat məlumatlarına əsasən, səthin kələ-kötürlüyünün formalaşmasında veriş (s) əsas təsiredici parametr kimi çıxış edir və onun artması R_a -nın artmasına səbəb olur. Kəsmə sürəti (v) isə əsasən istilik və triboloji proseslər vasitəsilə dolayı təsir göstərir. Kəsmə dərinliyi (t) və alət yeyilməsi (h_a) isə həm məhsuldarlıq, həm də səth keyfiyyəti üzərində mühüm rol oynayır [4, s. 405–420], [5, s. 100–120], [6], [12]. Empirik modelə əsasən verişin səthin kələ-kötürlüyünə təsiri qrafik olaraq Şəkil 3-də təqdim olunmuşdur.



Şəkil 3. Veriş s (mm/dövr) ilə səthin kələ-kötürlüyü R_a (μm) arasında nəzəri asılılıq

Şəkil 3-dən göründüyü kimi, verişin artması səthin kələ-kötürlüyünün artmasına səbəb olur və bu, onun səth mikroyefinin formalaşmasında dominant parametrlər olduğunu göstərir. Konik səthlərin emalında dəyişən diametr səbəbindən kəsmə sürəti sabit qalmır və modellər lokal xarakter alır. Buna görə empirik modellər dəyişən kinematik şərait üçün uyğunlaşdırılmalıdır [7], [8, s. 200–220], [20], [21].

Beləliklə, empirik modelləşdirmə texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında mürəkkəb asılılıqların riyazi təsvirini təmin edərək optimallaşdırma məsələlərinin həlli üçün əsas yaradır.

NƏTİCƏ

Aparılan tədqiqatlar göstərir ki, RPI torna dəzgahlarında konik səthlərin emalı mürəkkəb, çox-parametrlili və qeyri-stasionar prosesdir. Texnoloji parametrlərin qarşılıqlı təsiri səthin kələ-kötürlüyü və məhsuldarlıq arasında ziddiyyət yaradır. Müəyyən edilmişdir ki, veriş səthin formalaşmasında əsas parametrdir, kəsmə sürəti isə əsasən dolayı təsir göstərir. Kəsmə dərinliyi və alət yeyilməsi isə həm keyfiyyətə, həm də məhsuldarlığa təsir edən mühüm amillərdir. Konik səthlərdə diametrin dəyişməsi kəsmə sürətinin sabit saxlanmasını çətinləşdirir və bu səbəbdən texnoloji parametrlərin adaptiv idarə olunması tələb olunur. Empirik modelləşdirmə texnoloji parametrlərlə çıxış göstəriciləri arasında qeyri-xətti asılılıqların müəyyən edilməsinə imkan verir, çoxmeyarlı optimallaşdırma isə keyfiyyət və məhsuldarlıq arasında optimal balansın seçilməsini təmin edir. Süni intellekt metodlarının tətbiqi bu proseslərin daha dəqiq modelləşdirilməsinə, optimal rejimlərin avtomatik seçilməsinə və emalın real vaxtda idarə olunmasına imkan yaradır.

Beləliklə, optimallaşdırma və süni intellekt metodlarının inteqrasiyası texnoloji parametrlərin effektiv idarə olunması və emal prosesinin səmərəliliyinin artırılması üçün perspektivli yanaşmadır.

Bu iş Azərbaycan Elm Fondunun maliyyə dəstəyi ilə yerinə yetirilmişdir - Qrant № **AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M-01**

ƏDƏBİYYAT

1. Astakhov V.P. Tribology of Metal Cutting. Amsterdam: Elsevier, 2006, 424 p.
2. Koshin A.A. Obrabotka na tokarnykh stankakh: naladka, rezhimy rezaniya. Spravochnik [Processing on lathes: adjustment, cutting conditions. Handbook]. Chelyabinsk, Siti-Print, 2012. 744 p.
3. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Modeling of machining accuracy of conical surfaces on CNC machine tools. Proceedings, 2025, vol. 2, pp. 59–67.
4. Grzesik W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications. Amsterdam: Elsevier, 2008, 536 p.
5. Stephenson, D.A., Agapiou J.S. Metal Cutting Theory and Practice. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016, 933 p.
6. Dadashov R.Y., Yusubov N.D., Abbasova H.M. Modeli sil rezaniya pri mekhanicheskoy obrabotke na sovremennykh stankakh tokarnoy gruppy (Models of Cutting Forces During Mechanical Machining on Modern Machines of Turning Group). Proceedings of the All-Russian Forum of Young Researchers - 2023, 2023, pp. 236–246.
7. Balabanov I., Movlazade V., Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R., Huseynov R. Development of a Parametric Model for Calculating Cutting Forces in External Cylindrical Turning of 20CRMN Steel (1.7147) Using an SNMG 15 06 16-pr 4425 Insert. Reliability: Theory and Applications, 2025, Vol. 20, Issue 7, pp. 335–342.
8. Trent E.M., Wright P.K. Metal Cutting. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000, 446p.
9. Simon S., Yusubov N.D., Amirli S.F., Amirov F.G. Waterjet cutting of HARDX-500 workpiece. Russian Engineering Research, 2024, vol. 44, no. 11, pp. 1572–1576.
10. Simon S., Yusubov N.D., Amirli S.F., Amirov F.G. Hardness of Surface Layers Obtained after Waterjet Cutting of Chromium-Nickel Steel Workpieces. Russian Engineering Research, 2025, 45, pp. 1714–1718.
11. Ardashev D., Shipulin L., Degtyareva-Kashutina A., Yusubov N. Research on chrome plating quality of the internal surfaces in the hydraulic drives with hydrostatic guideways. Materials Science Forum, 2021, 1037 MSF, pp. 417–422. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.417
12. Nalbant M., Gökkaya H., Sur G. Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. Materials & Design, 2007, Vol. 28, No. 4, pp. 1379–1385.
13. Ardashev D., Yusubov N., Shipulin L., Degtyareva-Kashutina A. Development of environmental protection system for installation of chrome plating of the internal surfaces of hydraulic drives with hydrostatic guideways. E3s Web of Conferences, 2020, 193, 02015. DOI: 10.1051/e3sconf/202019302015

14. Mia M., Dhar N.R. Prediction of surface roughness in hard turning under high pressure coolant using artificial neural network. *Measurement*, 2016, Vol. 92, pp. 464–474.
15. Yusubov N., Abbasova, H. Models of Cutting Forces in The Matrix Theory of Multitool Machining Accuracy. *Key Engineering Materials*, 2024, 979, pp. 27–38. DOI: 10.4028/p-bW48Sb
16. Gupta A., Singh, H., Aggarwal A. Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel. *Expert Systems with Applications*, 2011, Vol. 38, No. 6, pp. 6822–6828.
17. Savin I. A., Movlazade V. Z., Yusubov N. D., Shaparev A. V., Khankishiyev I. A., Abbasova H. M., Huseynov Y. E. Comprehensive study of thermal, optical and material factors influencing fiber laser cutting efficiency. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 2025, No. 4, pp. 351–359.
18. Asiltürk İ., Akkuş H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement*, 2011, Vol. 44, No. 9, pp. 1697–1704.
19. Simon S., Yusubov N.D., Amirli S.F., Amirov F.G. Surface Roughness of Chromonickel Steel after Water Jet Machining: A Full Factorial Experiment. *Russian Engineering Research*, 2025, 45(3), pp. 341–345.
20. Yusubov N., Abbasova H., Dadashov R. Matrix Model of Accuracy in Machining Conical Surfaces on CNC Lathes. *Reliability Theory and Applications*, 2025, Vol. 20, Iss. 7, pp. 393–400.
21. Abellán-Nebot J.V., Vila Pastor C., Siller H.R. A review of the factors influencing surface roughness in machining and their impact on sustainability. *Materials*, 2021, Vol. 14, No. 3, pp. 1–31.

RPİ TORNA DƏZGAHLARINDA KONİK SƏTHLƏRİN EMALI ZAMANI ÇOXMEYARLI OPTİMALLAŞDIRMA VƏ SÜNİ İNTELLEKT YANAŞMALARI

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

Xülasə. Məqalədə RPİ torna dəzqahlarında konik səthlərin emalı zamanı texnoloji parametrlərin səth keyfiyyəti və məhsuldarlığa təsiri sistem yanaşması əsasında təhlil edilmişdir. Göstərilmişdir ki, emal prosesi çoxparametrlı, qarşılıqlı əlaqəli və qeyri-stasionar xarakter daşıyır. Səth kələ-kötürlüyü yalnız həndəsi amillərlə deyil, həm də deformasiya, istilik və triboloji proseslərin təsiri ilə formalaşır. Veriş əsas təsiredici parametr kimi müəyyən edilmiş, kəsmə sürəti və kəsmə dərinliyinin isə əsasən dolayı təsir göstərdiyi göstərilmişdir. Konik səthlərin emalı zamanı diametrin dəyişməsi kəsmə sürətinin lokal dəyişməsinə səbəb olur və klassik modellərin tətbiqini məhdudlaşdırır. Səth keyfiyyəti ilə məhsuldarlıq arasındakı ziddiyyət çoxmeyarlı optimallaşdırma problemi kimi təqdim olunmuş, Pareto yanaşması əsasında həll imkanları göstərilmişdir. Süni intellekt metodlarının tətbiq perspektivləri də əsaslandırılmışdır.

Açar sözlər: RPİ torna dəzqahı, konik səthlər, səth keyfiyyəti, çoxmeyarlı optimallaşdırma, süni intellekt.

Accepted: 29.04.2026

ANALYSIS OF ENERGY LOSS MECHANISMS IN PROCESS FURNACES AND ENGINEERING STRATEGIES FOR THERMAL EFFICIENCY ENHANCEMENT

Javid Azer Mustafayev

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

javid.a.mustafayev@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-5912-1266>

Abstract. Process furnaces constitute a critical component of thermal energy consumption in petroleum refining systems, where even minor efficiency deviations can result in considerable fuel and economic losses. The present study investigates the principal mechanisms responsible for energy dissipation in fired process heaters and evaluates engineering-oriented measures for their mitigation. A structured heat balance formulation is applied to quantify losses associated with flue gases, external wall radiation, air leakage, and incomplete combustion phenomena. The analysis emphasizes the thermodynamic sensitivity of furnace efficiency to excess air ratio and exhaust gas temperature. Based on the obtained analytical relationships, practical improvement pathways are outlined, including combustion control optimization, enhancement of refractory insulation performance, and integration of heat recovery technologies. The proposed assessment framework offers a technically grounded basis for operational diagnostics and efficiency-oriented decision-making in refinery furnace systems.

Keywords. *Process furnace, Fired heater efficiency, Energy dissipation, Heat balance methodology, Combustion performance.*

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Introduction. Process furnaces represent one of the primary thermal energy consumers in petroleum refining and petrochemical facilities. In many refinery units, fired heaters operate continuously under high-temperature conditions, making their thermal performance directly linked to fuel utilization, operational stability, and environmental impact [1, pp. 25–42]. Even marginal inefficiencies in combustion or heat transfer processes may lead to substantial cumulative energy losses over prolonged operating periods. Heat transfer in process furnaces is predominantly governed by radiation, particularly within the high-temperature combustion zone [2, pp. 87–105]. The interaction between flame characteristics, furnace geometry, and heat-absorbing surfaces determines the distribution of thermal flux inside the radiant section. In addition to useful heat absorbed by process tubes, a significant portion of supplied energy leaves the system in the form of stack gas losses, wall radiation, and unburned chemical energy [3, pp. 112–130]. Among the various operational parameters, the excess air ratio plays a decisive role in controlling combustion completeness and flue gas temperature. While insufficient air may result in incomplete combustion and CO formation, excessive air increases flue gas mass flow and reduces overall efficiency [4, pp. 155–172]. Consequently, achieving a balanced combustion regime is essential for stable furnace performance. Industrial standards for refinery fired heaters emphasize the importance of proper heat balance evaluation and efficiency monitoring [5, pp. 286–305]. However, in practical operation, energy losses are often distributed across multiple mechanisms rather than originating from a single dominant factor. A systematic analytical assessment is therefore required to identify the most influential contributors to efficiency degradation [6]. The present study aims to examine the principal energy loss mechanisms in process furnaces through a structured heat balance approach and to evaluate technically feasible strategies for reducing thermal inefficiencies in refinery applications.

Research objective and problem statement. Despite decades of technological development in combustion systems, process furnaces in refinery environments continue to operate with measurable thermal inefficiencies. While modern control systems provide real-time monitoring of oxygen concentration and flue gas temperature, performance evaluation in many facilities remains limited to overall efficiency indicators or fuel consumption tracking [7]. Such aggregated metrics do not reveal the internal distribution of energy losses and therefore do not support targeted corrective actions. A fundamental engineering challenge lies in the multi-mechanism nature of energy dissipation in fired

heaters [8]. Thermal input supplied through fuel combustion is redistributed through several parallel pathways: useful heat transfer to process tubes, sensible heat discharge through flue gases, conductive and radiative losses through furnace walls, and minor chemical losses associated with incomplete combustion [9, pp. 360–382]. These mechanisms are interdependent rather than isolated. For instance, adjustment of excess air ratio may reduce incomplete combustion losses but simultaneously increase stack-related heat discharge. Consequently, isolated parameter tuning without systemic evaluation may unintentionally shift losses from one mechanism to another rather than improving overall efficiency [10, pp. 28–40]. Another complexity arises from the operational variability of refinery furnaces. Load fluctuations, fuel composition changes, and gradual refractory degradation alter thermal behavior over time. In such conditions, efficiency deterioration may occur gradually and remain undetected if not analyzed through a structured energy balance framework. Therefore, a method capable of separating operational losses from structural losses becomes essential for rational performance diagnostics.

The central problem addressed in this study is the absence of a transparent and practically applicable analytical model that quantifies individual energy loss components using accessible operational parameters. While advanced numerical simulations provide detailed insights, their implementation requires computational resources and specialized expertise, limiting their applicability for routine industrial diagnostics [11]. There exists a practical need for an intermediate-level analytical tool that bridges theoretical thermodynamic principles and everyday engineering decision-making. Accordingly, the primary objective of this research is to formulate and apply a heat balance–based methodology that identifies dominant loss mechanisms in process furnaces and evaluates their relative impact on overall thermal efficiency. Particular emphasis is placed on the thermodynamic sensitivity of stack losses to excess air ratio and flue gas temperature, as these parameters are directly measurable and adjustable in refinery operation [12]. By establishing quantitative relationships between operating variables and efficiency degradation, the study aims to provide a structured foundation for performance improvement strategies without reliance on complex numerical modeling.

Furthermore, the research seeks to clarify the interaction between operational control variables and structural design characteristics. Through analytical decomposition of energy flows, the proposed framework enables differentiation between losses that can be mitigated through combustion optimization and those requiring mechanical or insulation improvements. This distinction is critical for prioritizing technical interventions and allocating maintenance resources efficiently.

In summary, the study addresses both a diagnostic gap and a methodological need within refinery furnace performance evaluation. By integrating thermodynamic principles with practical engineering considerations, it aims to transform efficiency analysis from a descriptive indicator-based practice into a mechanism-oriented assessment approach.

Methods of problem solution. The performance assessment of a process furnace requires a structured decomposition of supplied chemical energy into useful and dissipative components. Under steady-state operation, and neglecting transient accumulation effects, the conservation of energy principle may be expressed in generalized form as:

$$Q_{fuel} = Q_{abs} + Q_{loss} \quad (1)$$

For engineering evaluation, the total loss term is further separated into physically interpretable mechanisms:

$$Q_{fuel} = Q_{abs} + Q_{stack} + Q_{wall} + Q_{leak} + Q_{unburned} \quad (2)$$

Where:

Q_{fuel} – heat given by fuel combustion,

Q_{abs} – heat transferred to process fluid,

Q_{stack} – sensible heat removed with flue gases,
 Q_{wall} – conductive and radiative heat transfer through furnace casing,
 Q_{leak} – energy impact of air infiltration,
 $Q_{unburned}$ – chemical losses due to incomplete combustion.

Thermal efficiency is defined as:

$$\eta = \frac{Q_{abs}}{Q_{fuel}} * 100\% \quad (3)$$

Where:

η – thermal efficiency.

This formulation enables identification of dominant loss contributors without requiring numerical simulation. Stack losses represent the largest fraction of energy dissipation in most fired heaters. The sensible heat transported by flue gases is evaluated as:

$$Q_{stack} = \dot{m}_{fg} * c_p * (T_{fg} - T_{amb}) \quad (4)$$

Where:

\dot{m}_{fg} – flue gas mass flow rate,

c_p – constant pressure specific heat capacity,

T_{fg} – flue gas temperature,

T_{amb} – ambient temperature.

The flue gas mass flow rate is directly influenced by excess air ratio. Increasing excess air increases nitrogen dilution and raises total exhaust mass, even if combustion remains complete. Therefore, stack loss sensitivity to excess air becomes thermodynamically significant. For analytical estimation, flue gas mass flow is approximated from stoichiometric combustion relationships with correction for excess air percentage. Heat dissipated through furnace walls is approximated using steady-state heat transfer relations:

$$Q_{wall} = U * A * (T_{surf} - T_{amb}) \quad (5)$$

Where:

U – overall heat transfer coefficient across refractory and insulation layers,

A – effective casing area,

T_{surf} – wall surface temperature.

To validate the applicability of the developed analytical framework, a representative refinery furnace operating at steady load is examined. Assumed operational parameters:

- Fuel input: 12 MW
- Flue gas temperature: 900°C
- Ambient temperature: 25°C
- Average flue gas specific heat: 1.1 $kJ/kg * K$
- Wall heat transfer coefficient: 0.8 $W/m^2 * K$
- Effective casing area: 450 m^2

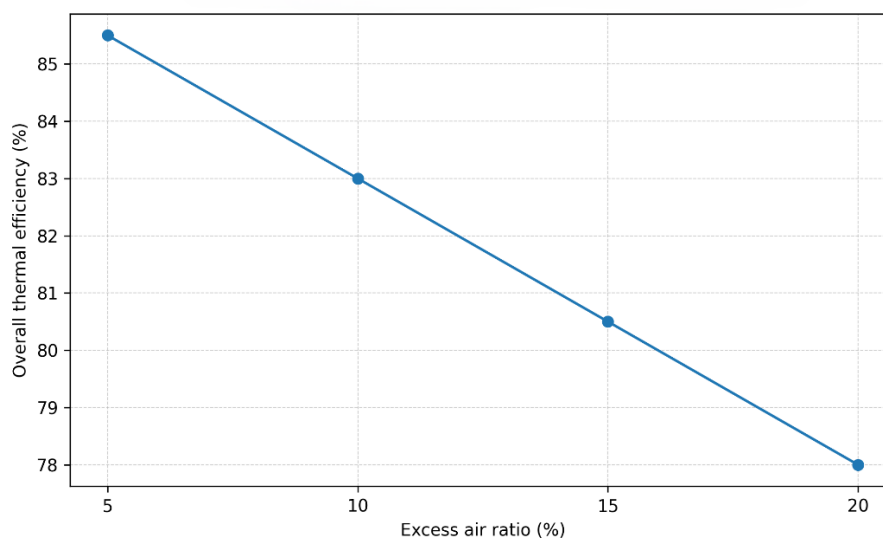
Two excess air scenarios are evaluated: 10% and 20%.

Influence of Excess Air on Stack Loss and Thermal Efficiency

Excess Air (%)	Flue Gas Flow (relative)	Stack Loss (%)	Wall Loss (%)	Overall Efficiency (%)
10	1.00	17	4	83
20	1.12	22	4	78

The results as shown in the table above indicate that increasing excess air from 10% to 20% leads to an approximate 5% reduction in thermal efficiency. This reduction is primarily attributed to increased flue gas enthalpy discharge rather than combustion improvement. Wall losses remain relatively stable under constant structural conditions, confirming that operational parameters exert stronger influence on stack-related dissipation. The parametric evaluation demonstrates that excess air control constitutes a high-impact operational variable. A 5% efficiency deviation in a 12 MW furnace corresponds to approximately 0.6 MW additional fuel demand. Over extended annual operation, such deviation translates into substantial economic and environmental consequences. The proposed heat balance framework therefore provides a technically transparent method for:

- Quantifying dominant loss contributors
- Prioritizing corrective actions
- Supporting energy audit procedures



Effect of excess air ratio on furnace thermal efficiency

Within the practical operating interval of excess air ratios (approximately 5–20%) as shown in the graph above, the relationship between excess air and thermal efficiency may be treated as quasi-linear for preliminary engineering evaluation. Although the underlying thermodynamic interactions are inherently non-linear, the combined influence of flue gas mass increase and moderate temperature variation produces an approximately proportional trend in this restricted range. Therefore, linear approximation provides sufficient accuracy for diagnostic and comparative analysis. Outside this interval, however, non-linear behavior becomes more pronounced and should be evaluated using more detailed methods.

Sensitivity analysis of key operating parameters. In addition to the base-case parametric evaluation, it is necessary to assess the sensitivity of furnace thermal efficiency to variations in key operating parameters. Sensitivity analysis enables identification of variables that exert the strongest influence on overall performance and therefore deserve priority in operational control strategies.

Stack-related losses exhibit a direct dependence on flue gas temperature. According to the heat balance formulation, sensible heat discharge increases proportionally with the temperature difference between exhaust gases and ambient conditions. For a representative 12 MW furnace, an increase in flue gas temperature from 850°C to 950°C, assuming constant mass flow rate, results in a measurable rise in stack heat loss. Even moderate temperature escalation can therefore reduce overall efficiency in a noticeable manner. This observation underlines the importance of maintaining effective heat transfer in radiant and convection sections to prevent unnecessary exhaust overheating.

Excess air ratio constitutes another highly sensitive operational parameter. Increasing excess air not only raises flue gas mass flow rate but also introduces thermal dilution effects due to additional nitrogen. While a certain margin of excess air is required to ensure complete combustion, excessive levels intensify sensible heat discharge through the stack. Within the practical operating range of 5–20%, efficiency variation may be approximated as quasi-linear for engineering estimation purposes. However, beyond this interval, non-linear behavior may become more pronounced due to stronger combustion temperature shifts and dilution effects.

Structural conditions also influence efficiency stability. An increase in wall heat transfer coefficient, caused by insulation degradation or refractory aging, leads to higher conductive and radiative losses. For example, if wall losses rise from 4% to 6% under otherwise identical firing conditions, overall efficiency decreases correspondingly. Although wall losses typically remain smaller than stack losses, their gradual growth over time can contribute to persistent efficiency deterioration.

Comparative evaluation indicates that stack-related parameters—particularly excess air ratio and exhaust temperature—exhibit greater sensitivity than structural heat losses under normal operating conditions. Consequently, operational optimization measures should be prioritized before structural modifications are considered. Systematic monitoring of oxygen concentration and flue gas temperature therefore provides the most immediate and technically feasible pathway for improving thermal performance in refinery furnace systems.

Application of the obtained results. The analytical assessment developed in this study provides a structured basis for practical performance evaluation of refinery process furnaces. By decomposing total thermal input into identifiable loss components, the proposed heat balance framework enables engineers to distinguish between operational and structural inefficiencies. From an operational perspective, the results indicate that excess air control represents a high-impact adjustment parameter. The parametric evaluation demonstrated that reducing excess air from 20% to 10% may increase thermal efficiency by approximately 5%. For a 12 MW furnace operating continuously, this improvement corresponds to nearly 0.6 MW reduction in fuel demand. Over long-term operation, such reduction translates into significant annual fuel savings and measurable emission mitigation. In addition to combustion control, the model supports diagnostic assessment of stack-related losses. Since stack gas discharge constitutes the dominant loss mechanism in the examined scenarios, monitoring flue gas temperature and oxygen concentration becomes essential for efficiency optimization. The presented framework may therefore serve as a simplified auditing tool for refinery energy management systems. The evaluation of wall heat losses further indicates that insulation integrity plays a stabilizing role in maintaining performance. Although wall losses remain comparatively smaller than stack losses under normal conditions, aging refractory materials or casing damage may progressively increase heat dissipation. The analytical relations introduced in this study allow preliminary estimation of such structural degradation effects without advanced numerical modeling.

Moreover, the developed approach can assist in preliminary feasibility assessments for waste heat recovery integration. By quantifying stack energy content, engineers may estimate recoverable heat potential prior to detailed design of economizers or air preheaters. This supports economically justified decision-making during modernization projects. Overall, the obtained results provide a technically transparent and practically applicable methodology for identifying dominant energy loss sources, prioritizing corrective actions, and supporting efficiency-oriented operational strategies in refinery furnace systems.

Conclusion. The conducted analysis demonstrated that thermal efficiency of process furnaces is governed by the combined influence of operational and structural parameters. By applying a structured heat balance framework, the study identified stack-related losses as the dominant mechanism of energy dissipation under typical refinery operating conditions. Among the examined variables,

excess air ratio and flue gas temperature exhibited the highest sensitivity with respect to overall efficiency variation. The parametric evaluation showed that moderate deviations in excess air may result in measurable efficiency deterioration, primarily due to increased flue gas mass flow and sensible heat discharge. In contrast, wall heat losses, although generally smaller in magnitude, may progressively increase in the presence of insulation degradation or refractory aging. These findings emphasize the necessity of systematic monitoring of combustion conditions and structural integrity. The proposed analytical approach provides a practical and transparent methodology for preliminary efficiency diagnostics without reliance on complex numerical simulations. Its application may support operational optimization, energy auditing, and informed decision-making in refinery furnace performance management.

REFERENCES

1. Baukal C.E. *Industrial Burners Handbook*. Boca Raton, CRC Press, 2004, 800 p.
2. Baukal C.E. *Heat Transfer in Industrial Combustion*. Boca Raton, CRC Press, 2000, 680 p.
3. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. *Swirl Flows*. Tunbridge Wells, Abacus Press, 1984, 488 p.
4. Turns S.R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. New York, McGraw-Hill, 2012, 720 p.
5. Glassman I., Yetter R.A., Glumac N.G. *Combustion*. Amsterdam, Academic Press, 2014, 800 p.
6. Norman A.W., Smith R. Waste Heat Recovery from Industrial Furnace Systems. *Applied Thermal Engineering*, 2013, Vol. 51, No. 1–2, pp. 604–612.
7. Kim S.H., Hwang J., Lee K.B. Analysis of Excess Air Effects on Thermal Efficiency in Industrial Furnaces. *Energy Conversion and Management*, 2015, Vol. 89, pp. 312–320.
8. Rahimpour M.R., Jokar S.M. Heat Transfer Efficiency in Refinery Furnaces: A Review of Operational Parameters. *Energy*, 2012, Vol. 45, No. 1, pp. 303–315.
9. Ganapathy V. *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators*. New York, Marcel Dekker, 2003, 700 p.
10. API Standard 560. *Fired Heaters for General Refinery Service*. Washington, American Petroleum Institute, 2016, 250 p.
11. Sánchez R., Palencia-Díaz A., Fábregas-Villegas J., Velilla-Díaz W. Fired Heaters Optimization by Estimating Real-Time Combustion Products Using Numerical Methods. *Energies*, 2024, Vol. 17, No. 23, pp. 1–14.
12. Zhao J., Ma L., Zayed M.E., Elsheikh A.H., Li W., Yan Q., Wang J. Industrial reheating furnaces: A review of energy efficiency assessments, waste heat recovery potentials, heating process characteristics and perspectives for steel industry. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, Vol. 147, pp. 1209–1228.

Accepted: 12.05.2026

APPLICATION OF FUZZY AHP-MOORA METHOD FOR POLYMERIC NANO-COMPOSITE MATERIAL SELECTION

Tural Latif Gojaye

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Azerbaijan University, Baku, Azerbaijan

Tural.Gojayev@au.edu.az, <https://orcid.org/0000-0002-1725-0298>

Abstract. Material selection is a crucial aspect of engineering processes and plays a decisive role in the success of final products. Improper material selection often leads to high costs and premature product failure. Therefore, a competent methodology for material selection is required to assist manufacturing organizations in choosing the best material for a specific application. Scientists have developed various selection techniques to address these issues. Multi-Criteria Decision Making (MCDM), which is also applied for material selection, has the potential to improve decision-making across all engineering areas. Another MCDM technique is the Multi-Objective Optimization based on Ratio Analysis (MOORA), introduced by Brauers and Zavadskas in 2006. As an extension of the AHP method, Fuzzy AHP plays a significant role, especially in cases of uncertainty. This article aims to select a polymeric nano-composite material for car bumper beams in the automotive industry based on the criteria of tensile strength, impact strength, comparative cost, and production difficulty using the integrated Fuzzy AHP-MOORA method. All material property indicators are classified as beneficial or non-beneficial.

Keywords: MOORA, Fuzzy-AHP, material selection, automotive industry.

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

1. Introduction

Material selection represents one of the most critical stages in engineering design, directly influencing product performance, durability, cost, and manufacturability. In recent decades, the development of new materials, particularly polymeric nano-composites, has introduced both opportunities and complexities to the selection process. These materials offer enhanced mechanical properties, such as improved tensile and impact strength, while potentially reducing weight and cost. However, selecting the optimal material from a growing array of alternatives requires systematic and reliable decision-making tools [1, pp. 1–32].

Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods have emerged as powerful tools to address such complex selection problems [2]. Unlike single-criterion approaches, MCDM allows decision-makers to consider multiple, often conflicting, criteria simultaneously. Within the broad family of MCDM techniques, the Analytic Hierarchy Process (AHP) and its fuzzy extension, Fuzzy AHP, are widely recognized for determining the relative importance (weights) of criteria, especially when human judgment involves uncertainty [3]. On the other hand, the Multi-Objective Optimization based on Ratio Analysis (MOORA) method provides a robust and computationally efficient framework for ranking alternatives based on these weighted criteria [4].

The automotive industry, with its stringent requirements for safety, performance, and cost-efficiency, presents a pertinent case for applying such integrated methodologies. Components like bumper beams demand materials that offer excellent impact resistance, adequate tensile strength, reasonable cost, and feasible production characteristics. This study focuses on applying the integrated Fuzzy AHP-MOORA method to select the most suitable polymeric nano-composite material for car bumper beams, thereby demonstrating a structured approach to a real-world engineering challenge [5].

2. Research Objective and Problem Statement

The primary objective of this research is to implement and evaluate a hybrid decision-making model combining Fuzzy AHP and MOORA for the optimal selection of polymeric nano-composite materials. The specific problem addressed is the selection of the best material for an automotive bumper beam from six candidate alternatives (Alt-1 to Alt-6). The selection is based on four critical criteria: tensile strength (beneficial, to be maximized), impact strength (beneficial, to be maximized),

comparative cost (non-beneficial, to be minimized), and production difficulty (non-beneficial, to be minimized). This work aims to provide a transparent, reproducible framework that can handle the inherent uncertainty in expert judgments and deliver a clear ranking of material alternatives.

3. Methodology

The methodology of this research is divided into two main phases: (1) determining the weights of the selection criteria using Fuzzy AHP to account for judgmental uncertainty, and (2) ranking the material alternatives using the MOORA method based on the obtained weights.

3.1. Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP)

The classical AHP method, developed by Saaty, uses a crisp pairwise comparison scale (1-9) to derive priority weights. However, human preferences are often vague and imprecise. Fuzzy AHP extends this by utilizing triangular fuzzy numbers (TFNs) to capture the uncertainty in decision-makers' judgments [3].

A TFN is denoted as (l, m, u), where l, m, and u represent the lower, most likely, and upper values, respectively. The steps for Fuzzy AHP are as follows [3, 7]:

Step 1: Construct a fuzzy pairwise comparison matrix. Experts compare the criteria in pairs using linguistic terms (e.g., equally important, moderately more important), which are then converted into TFNs.

Step 2: Calculate the fuzzy geometric mean for each criterion. For criterion i, the fuzzy geometric mean \tilde{r}_i is calculated as:

$$\tilde{r}_i = (\prod_{j=1}^n \tilde{a}_{ij})^{1/n} \quad (1)$$

where \tilde{a}_{ij} is the TFN comparing criterion i to j, and n is the number of criteria.

Step 3: Compute the fuzzy weights. The fuzzy weight \tilde{w}_i for criterion i is:

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (2)$$

where \otimes and \oplus denote fuzzy multiplication and addition, respectively.

Step 4: Defuzzify the fuzzy weights. The Center of Area (COA) method is used to convert the fuzzy weight $\tilde{w}_i = (lw_i, mw_i, uw_i)$ into a crisp value w_i :

$$w_i = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3} \quad (3)$$

Step 5: Normalize the crisp weights. The final normalized weight W_i for criterion i is obtained by:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

3.2. MOORA Method

The MOORA method, developed by Brauers and Zavadskas, is applied for the final ranking [4, 6, 8]. The steps are:

Step 1: Construct the decision matrix. A matrix $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ is formed, where m is the number of alternatives (6) and n is the number of criteria (4), and x_{ij} is the performance of alternative i on criterion j.

Step 2: Normalize the decision matrix. The normalized value n_{ij} is calculated using the vector normalization method to make the criteria dimensionless:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (5)$$

Step 3: Construct the weighted normalized matrix. The weighted normalized value v_{ij} is computed by multiplying the normalized value by its corresponding criterion weight W_j obtained from Fuzzy AHP:

$$v_{ij} = W_j \times n_{ij} \tag{6}$$

Step 4: Calculate the overall assessment score. For each alternative i , the score y_i is calculated by summing the weighted normalized values for beneficial criteria and subtracting the sum for non-beneficial criteria:

$$y_i = \sum_{j=1}^g v_{ij} - \sum_{j=g+1}^n v_{ij} \tag{7}$$

where g is the number of beneficial criteria.

Step 5: Rank the alternatives. The alternatives are ranked in descending order of their y_i scores. The alternative with the highest score is the most preferred.

4. Data and Criteria Weights

The performance data for the six polymeric nano-composite alternatives across the four criteria are presented in Table 1. Tensile and impact strength data are in MPa, while comparative cost and production difficulty are assessed on a relative scale of 1 to 6, where a lower value is preferable for these non-beneficial criteria.

Table 1

Material property indicators of the six nano-composites

Alternatives	Tensile strength (MPa)	Impact strength (MPa)	Comparative cost	Production difficulty
Alt-1	25.00	113.70	4	1
Alt-2	37.55	103.54	5	2
Alt-3	34.79	96.51	6	3
Alt-4	35.38	224.58	1	4
Alt-5	41.71	154.06	2	5
Alt-6	41.92	133.53	3	6

Applying the Fuzzy AHP process as described in Section 3.1, based on expert evaluations of the relative importance of the four criteria, the final normalized weights were determined. The results highlight that impact strength is considered the most critical factor for a bumper beam, followed by tensile strength. Cost and production difficulty, while important, carry less relative weight in this specific engineering context. The calculated weights are:

- Impact Strength (W_1): 0.564
- Tensile Strength (W_2): 0.302
- Comparative Cost (W_3): 0.089
- Production Difficulty (W_4): 0.046

4.1. MOORA Ranking

Following the MOORA steps, the decision matrix from Table 1 was normalized using Equation (5). The weighted normalized matrix was then computed using Equation (6) and the weights from Fuzzy AHP. Finally, the overall assessment score y_i for each alternative was calculated using Equation (7), where tensile and impact strength were treated as beneficial criteria (summed), and cost and production difficulty as non-beneficial (subtracted). The results are summarized in Table 2.

Table 2

Ranking of alternatives using the Fuzzy AHP-MOORA method

Alternatives	Overall Assessment Score (S_{y_i})	Rank
Alt-4	0.3426	1
Alt-5	0.1999	2
Alt-6	0.1309	3
Alt-1	0.0739	4
Alt-2	0.0347	5
Alt-3	0.0157	6

4.2. Analysis of Results

The ranking clearly identifies **Alternative 4 (Alt-4)** as the optimal choice for the automotive bumper beam application. Despite having a tensile strength (35.38 MPa) that is not the highest among the candidates, Alt-4 possesses a vastly superior impact strength (224.58 MPa), which is the most heavily weighted criterion. Furthermore, it has the lowest possible comparative cost (1). Although its production difficulty rating (4) is not the best, its exceptional performance on the two most important criteria outweighs this drawback.

Alternative 5 (Alt-5) and Alternative 6 (Alt-6) secure the second and third ranks, respectively. They both offer high tensile strength and good impact resistance but are penalized by higher cost and production difficulty scores compared to Alt-4. The lower-ranked alternatives (Alt-1, Alt-2, Alt-3) are characterized by significantly lower impact strength values, which leads to their poor performance in the overall assessment [5,9].

5. Discussion and conclusion

The application of the integrated Fuzzy AHP-MOORA method proved to be highly effective for this material selection problem. The Fuzzy AHP component successfully quantified the subjective preferences of decision-makers regarding the criteria, transforming linguistic assessments into precise numerical weights while accounting for uncertainty. The subsequent MOORA analysis provided a clear, mathematically sound ranking that directly reflects these priorities.

The outcome is logically consistent with engineering intuition for a safety-critical component like a bumper beam: impact resistance is paramount. The model's strength lies in its ability to make this intuition explicit, quantifiable, and defensible. It systematically avoids the pitfalls of ad-hoc selection and ensures that all relevant factors are considered in a balanced manner.

This study's findings align with and extend the work of previous researchers who have applied MCDM techniques to material selection. The hybrid approach used here offers a practical framework that can be adapted to other material selection problems in various industries by simply modifying the set of criteria and alternatives.

This research demonstrated the successful application of an integrated Fuzzy AHP-MOORA model for selecting polymeric nano-composite materials for automotive bumper beams. The model effectively combined the strengths of both methods: Fuzzy AHP to handle the uncertainty in determining criterion importance, and MOORA to execute a straightforward and robust ranking of alternatives. The analysis identified Alt-4 with its exceptional impact strength and low cost, as the most suitable material among the six candidates considered.

The proposed methodology is transparent, systematic, and can be easily implemented by engineers and decision-makers. It provides a rational basis for material selection that can improve product quality, reduce costs, and shorten development time.

For future work, the model could be enhanced in several ways. Firstly, other fuzzy set representations (e.g., trapezoidal fuzzy numbers, intuitionistic fuzzy sets) could be explored within the AHP framework. Secondly, the MOORA method could be compared with or combined with other

ranking techniques like TOPSIS or VIKOR to assess result stability. Finally, the set of selection criteria could be expanded to include environmental factors (e.g., recyclability, carbon footprint) and other lifecycle considerations to support sustainable material selection.

REFERENCES

1. Aliev R.A. Uncertain computation-based decision theory. World Scientific Publishing, 2017, 531 p.
2. Farag M.M., El-Magd E. An integrated approach to product design, materials selection and cost estimation. *Materials & Design* 13, 1992, pp. 323–327.
3. Zheng M., Wang Y., Teng H. A new “intersection” method for multi-objective optimization in material selection. *Tehnički glasnik* 15(4), 2021, pp. 562–568.
4. Babanli M.B., Gojayev T.L. Application of Fuzzy AHP method to material selection problem. In: 11th International Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, Tashkent, Uzbekistan, vol. 1323, 2020, pp. 254–261.
5. Gardashova L.A. Z-number based TOPSIS method in multi-criteria decision making. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham, vol. 896, 2018, pp. 42–51.
6. Brauers W.K.M., Zavadskas E.K. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and Cybernetics* 35, 2006, pp. 445–469.
7. Karande P., Chakraborty S. Application of multi-objective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) method for materials selection. *Materials and Design* 37, 2012, pp. 317–324.
8. Hasanzadeh R., Azdast T., Lee R.E., Afsari Ghazi A. Experimental polymeric nano-composite material for automotive bumper beam by using multi-criteria decision making methods. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering* 14(3), 2017, pp. 1–10.
9. Buckley J.J. Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems* 17(1), 1985, pp. 233–247.

Accepted: 14.05.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ АПШЕРОНСКОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Лейла Мамед кызы Гасратова

Бакинский Инженерный Университет, Хырдалан, Азербайджан

RESEARCH AND IDENTIFICATION OF PROBLEMS OF THE ABSHERONSKY RING RAILWAY

Leyla Mammad Hasratova

Baku Engineering University, Khirdalan, Azerbaijan: lhasratova@beu.edu.az

<https://orcid.org/0009-0008-9753-4581>

Abstract. The article examined the passenger station on May 28, and carried out a full analysis of the Baku-Sumgayit section. All the necessary elements for constructing a passenger train schedule were also noted. The operating technology of passenger stations is determined by the categories of trains served. Passenger trains, long-distance transit and of their own formation, local and suburban, pass through the passenger station. The technology for processing these trains is based on the maximum reduction of time for carrying out operations, minimal costs for servicing and equipping trains, accelerating the turnover of trains and reducing their number. Next, the passenger traffic plan is analyzed and important points in its construction are noted.

When linking the main elements of the station, attention was paid to the concepts of pace and technological interval and calculated in the directions Baku-Khirdalan-Sumgayit and Baku-Prishaghi-Sumgayit. Research has also shown that the actual movement is not circular, but in two semi-arc directions. The authors proposed to build a railway line from Guzdek to Sumgayit-Pasazhirskaaya, which would provide circular traffic on the line.

Keywords: passenger station, route, schedule, train.

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

Введение

Апшеронская кольцевая линия – это линия маршрутов железнодорожного пассажирского транспорта в Баку с пересадками в метро, которые являются платными. Исследование по теме проводилось непосредственно самим автором на Бакинском железнодорожном вокзале, который является отправной точкой рассмотренной линии. Скорости поезда имеют курс от Бакинской до Сумгаитской станции, так же в двух направлениях, проезжая другие пассажирские станции по Апшеронской линии. Длина линий на Апшеронской кольцевой линии составляет 93 километра. В общем пути подвижной состав охватывает 15 станций. Она целиком охватывает пригородную часть города Баку, что делает ее привлекательным для пассажиров, которые интенсивно пользуются ею каждый день. В связи с этим, работы и необходимые расчеты по ее исследованию являются актуальными и необходимыми.

Исследовательская часть

В данный момент на линии Баку-Сумгаит со станциями Баладжары и Хырдалана движутся 15 пар поездов в сутки. Рейсы номеруются от 6001 до 6030, из них поезда с четным числом отправляются со станциями Сумгаит, поезда с нечетными из Баку. Некоторые рейсы, такие как 6001-6006, 6010, 6013, 6017, 6019, 6022-6026, 6030 работают только по рабочим дням. Самый первый электропоезд из Баку отправляется в -07:50, а самый поздний в 20:45. Расписание маршрута или же времени может поменяться от факта проведения ремонтных работ или же массовых мероприятий (например, при проведении большого концерта или же Европейских игр).

На сегодняшний день на станции Баку-Пиршаги с промежуточными станциями Кишлы, Кероглу, Бакиханов, Сабунчи, Забрат-1, Забрат-2, Мехеммеди имеют курс пятнадцать пар поездов в сутки. Рейсы же нумеруются от 6031-6060, поезда, имеющие четный рейс, отправляются из Пиршаги, поезда с нечетными рейсами отправляются из Баку. Рейсы с номерами 6032,6034,6042,6046,6050,6054,6058 и 6060 выходят на линию только по рабочим дням.

Подвижной состав использует 9 двухэтажных электропоездов серии ЭШ2 с номерами 008,003,009,015-020 которые были разработаны компанией STADLER RAIL GROUP: сделанных на Белорусском заводе Stadler Минск.

Организация движения осваивается на построение графика движения поездов (табл. 1 и 2) [1, с. 321–323].

График движения обязан удовлетворять следующие пункты:

- требование к пассажирским перевозкам;
- обеспечение безопасного движения поездов;
- использование высокой продуктивности подвижного состава;
- соблюдение рабочего времени бригады локомотива;
- использование с улучшением выпуска станций и увеличения объема грузоподъемности.

В графике движения показаны движение и расположение на каждой станции, площади в одиночном и парном направлениях.

Таблица 1

График движения Баку-Хырдалан-Сумгаит

АЖД	№6001	№6005	№6007	№6009	№6013	№6015	№6065 Экспресс	№6017	№6019	№6021	№6023
	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp
ст. Баку	07:20	07:45	08:10	08:30	17:00	17:25	18:10	18:25	18:35	18:50	19:35
ст. Баладжары	07:34	07:59	08:24	08:44	17:14	17:39	–	18:39	18:49	19:04	19:49
ст. Сумгаит	07:42	08:06	08:31	08:52	17:22	17:47	–	18:47	18:57	19:12	19:57
Прибытие на ст. Сумгаит	08:00	–	*	09:10	17:40	18:05	18:50	19:05	19:15	19:30	20:15

Таблица 2

График движения Баку-Пиршаги-Сумгаит-Баку

Баку-Пиршаги-Сумгаит										
АЖД	№6601	№6603	№6605	№6613	№6615	№6617	№6619	№6621	№6623	№6625
	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp
ст. Баку	08:20	08:45	09:55	08:35	19:15	20:05	20:45	21:20	22:00	23:00
ст. Кишлы	08:25	08:50	10:00	08:40	19:20	20:10	20:50	21:25	22:05	23:05
ст. Кероглу	08:29	08:54	10:04	18:44	19:24	20:14	20:54	21:29	22:09	23:09
ст. Бакиханов	08:33	08:58	10:08	18:48	19:28	20:18	20:58	21:33	22:13	23:13
ст. Сабунчи	08:36	09:01	10:11	18:51	19:31	20:21	21:01	21:36	22:16	23:16
ст. Забрат-1	08:41	09:06	10:16	18:56	19:36	20:26	21:06	21:41	22:21	23:21
ст. Забрат-2	08:44	09:09	10:19	18:59	19:39	20:29	21:09	21:44	22:24	23:24
ст. Мехеммедли	08:47	09:12	10:22	19:02	19:42	20:32	21:12	21:47	22:27	23:27
ст. Пиршаги	08:55	09:20	10:30	19:10	19:50	20:40	21:20	21:55	22:35	23:35
ст. Гёрядиль	09:00	09:25	10:35	19:15	19:55	20:45	21:25	22:00	22:40	23:40
ст. Новханы	09:04	09:29	10:39	19:19	19:59	20:49	21:29	22:04	22:44	23:44
Прибытие на ст. Сумгаит	09:12	09:37	10:47	19:27	20:07	20:57	21:37	22:12	22:52	23:52

Сумгаит-Пиршаги-Баку										
АЖД	№6602	№6604	№6606	№6608	№6610	№6618	№6620	№6622	№6624	№6626
	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp	totnp
ст. Сумгаит	06:50	07:40	08:45	09:30	10:00	18:10	19:35	20:15	20:50	21:50
ст. Новханы	06:59	07:49	08:54	09:39	10:09	18:19	19:44	20:24	20:59	21:59
ст. Гёрядиль	07:03	07:53	08:58	09:43	10:13	18:23	19:48	20:28	21:03	22:03
ст. Пиршаги	07:08	07:58	09:03	09:48	10:18	18:28	19:53	20:33	21:08	22:08
ст. Мехеммедли	07:15	08:05	09:10	09:55	10:25	18:35	20:00	20:40	21:15	22:15
ст. Забрат-2	07:19	08:09	09:14	09:59	10:29	18:39	20:04	20:44	21:19	22:19
ст. Забрат-1	07:22	08:12	09:17	10:02	10:32	18:42	20:07	20:47	21:22	22:22
ст. Сабунчи	07:27	08:17	09:22	10:07	10:37	18:47	20:12	20:52	21:27	22:27
ст. Бакиханов	07:30	08:20	09:25	10:10	10:40	18:50	20:15	20:55	21:30	22:30
ст. Кероглу	07:34	08:24	09:29	10:14	10:44	18:54	20:19	20:59	21:34	22:34
ст. Кишлы	07:37	08:27	09:32	10:17	10:47	18:57	20:22	21:02	21:37	22:37
Прибытие на ст. Баку	07:42	08:32	09:37	10:22	10:52	19:02	20:29	21:07	21:42	22:42

Поезда, держащие путь в одиночном направлении – это поезда, движущиеся в сторону востока и запада, а парные – в сторону Юга и Севера.

В ходе движения поезда, диспетчер составляет график об успешном прохождении заранее запланированного графика движения. Здесь же особое внимание уделяется соблюдению графика движения, в случае опозданий или же задержек во время движения диспетчер обязан вернуть утраченное время и прибыть на станцию строго по графику. Число поездов в зависимости от вагонов находящихся в парке вагонов, каждый из них имеет собственный график работы.

Случаи, когда пассажир опаздывает к себе домой или же в пункт назначения, является запретной. Если же вдруг произойдет такой случай, то здесь рассматривается весь график движения, после того как найдется причина опоздания, заводится акт об опоздании. Бригада поезда должна стараться, чтобы поезд двигался строго по графику.

Остановка поезда с помощью красного флага, красного цвета фонаря, или же стоп-крана разрешена, только если пассажирам или же движению поезда грозит опасность. Если же поезд остановится без повода для остановки, то состав поезда получает штраф, за нарушение закона железной дороги. В случае того, если же остановка поезда последует за собой тяжелую аварию, повреждение подвижного состава или же пострадает какой-либо пассажир, то состав поезда будет привлечен к уголовному делу. План движения дан на рис 1.

Создавая план движения пассажирских перевозок, были совмещены потребности пассажиров с возможностями железнодорожного транспорта. В ходе его создания основные моменты учитываются основные моменты, технологический процесс работы станций, возможность для пропуска движения грузовых вагонов, а также связка железнодорожного транспорта с другими видами транспорта [2, с. 17–19].



Рис. 1. План движения Апшеронской кольцевой линии

В плане движения должна быть показана следующая информация [3, с. 123–126]:

- список станций смены локомотивов без и с электроусплителем,
- станции, оснащенные водой,
- станции способные оснащать сильным бензином и находящиеся на пути пассажирских вагонов,
- станции способные очищать вагоны от мусора,
- список станций с возможностью замены пар колес на пассажирских вагонах,
- схема подвижного состава,
- места, в которых есть электромеханик поезда,
- график движения сопряженных вагонов,
- пункты с возможностью замены маршрута,
- время, в которое прибудет или же произведет остановку той или иной поезд.

Расчетная часть

Условия взаимодействия элементов станции выражаются через два понятия: темп и технологический интервал [2, с. 56–57]. Темпом называется число операций, выполняемых в единицу времени T (в 1 ч).

Технологический интервал – время, затрачиваемое на выполнение операции, или интервал J между двумя однородными операциями.

Определим средние темпы и технологический интервал по направлениям.

На участке Баку-Хырдалан-Сумгаит функционирует 12 пар поездов в сутки:

$$T_{\text{ср}} = \frac{N}{24} = \frac{12}{24} = 0,5, \text{ т.е. 1 поезд за 2 часа}$$

$$J_{\text{пр}}^{\text{ср}} = \frac{1440}{N} = \frac{1440}{12} = 120 \text{ минут или 2 часа}$$

На участке Баку-Пиршаги-Сумгаит функционирует 10 пар поездов в сутки:

$$T_{\text{ср}} = \frac{N}{24} = \frac{10}{24} = 0,41, \text{ т.е. 1 поезд за 2 часа}$$

$$J_{\text{пр}}^{\text{ср}} = \frac{1440}{N} = \frac{1440}{10} = 144 \text{ минут или 2 часа 40 минут}$$

Но средним темпом и средним интервалом пользоваться в расчетах нельзя, так как в отдельные периоды суток наблюдается сгущенный подвод поездов к станции и из-за ограниченности числа путей в парке могут возникнуть задержки поездов по неприему. Поэтому надо пользоваться не средними значениями, а расчетными ($T_{\text{расч}}$, $J_{\text{расч}}$), которые определяются следующим образом:

$$T_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{ср}} + T_{\text{max}}}{2},$$

где T_{max} – максимальное число операций в единицу времени;

$$J_{\text{расч}} = \frac{J_{\text{пр}}^{\text{ср}} + J_{\text{пр}}^{\text{min}}}{2},$$

$J_{\text{пр}}^{\text{min}}$ – минимальный интервал между однородными операциями.

Условия взаимодействия по интервалу формулируются так:

- расчетный интервал J прибытия поездов на станцию должен быть не меньше расчетного интервала $J_{\text{об}}$ обработки поездов по прибытии в парке;

- расчетный интервал $J_{оп}$ обработки поездов в парке должен быть не меньше расчетного интервала J_p расформирования (или горочного интервала);
- расчетный интервал J_p расформирования (горочный интервал) должен быть не меньше расчетного интервала накопления в парке C и т.д.

Условия взаимодействия по темпу:

- темп T отправления поездов на участок должен быть не меньше темпа $T_{о.о}$ обработки поездов по отправлению в парке отправления;
- темп $T_{о.о}$ обработки поездов в парке отправления должен быть не меньше темпа $T_{о.ф}$ окончательного формирования поездов на вытяжках и т.д.

Несоблюдение определенных условий приведет к сбою в работе станции. Так, если в парке прибытия на обработку состава затрачивается 20 мин, а с прилегающего участка поезда поступают через 15 мин, то через определенное время парк прибытия с работой не справится, потому что прибывающие составы будут простаивать в ожидании обработки. После занятия всех путей в парке последствия несогласованности окажутся еще более серьезными — поезда останутся по неприему на подходах к станции [4].

Для обеспечения бесперебойного приема поездов надо ускорить обработку поездов в парке приема. Известно, что лимитирующей операцией в обработке поездов по прибытии является техническое обслуживание бригадой ПТО. Значит, технологический интервал обработки составов по прибытии необходимо сократить, выполняя ряд мероприятий при более рациональных маршрутах следования бригад, внедряя совершенные средства связи с СТС, дежурным по парку, оператором ПТО, укрупняя бригады. Так, на практике двухгруппная бригада затрачивает на техническое обслуживание состава из 60 вагонов в среднем 25 мин, а бригада из 4 групп – 15 мин.

Затем рассчитаем основные технико-экономические показатели пассажирских перевозок.

К качественным показателям относятся:

- количество перевезенных пассажиров ($\sum A$). Определяется по числу проданных билетов;
- пассажирооборот на дороге, отделении, станции, представляет собой сумму отправленных ($\sum A_{от}$) и прибывших пассажиров ($\sum A_{пр}$);

$$\sum A = \sum A_{от} + \sum A_{пр} \quad (1)$$

$$\sum A = 50 + 45 = 95 \text{ чел.},$$

- объем планируемой или выполненной работы дороги, отделения и сети в целом по пассажирским перевозкам:

$$\sum AL = \sum_{i=1}^n A \cdot l \quad (2)$$

$$\sum AL = 95 \cdot 16 = 1520 \text{ чел/км},$$

где A_i – количество перевезенных пассажиров по какому-либо направлению, участку;

L_i – средняя дальность поездки;

- пробеги поездов, $\sum NL$:

$$\sum NL = \sum_{i=1}^n N_i \cdot L_i \quad (3)$$

$$\sum NL = 4 \cdot 16 = 64 \text{ км},$$

где N_i – число поездов рассматриваемого направления;

- пробеги вагонов, определяются с учетом количества вагонов в поездах различных категорий:

$$\sum nL = \sum_{i=1}^{K_{уч}} \cdot \sum_{j=1}^{K_{пф}} m_j \cdot N_{ij} \cdot L_i \quad (4)$$

$$\sum nL = 80 \cdot 3 \cdot 2 = 480 ,$$

где m_j – число вагонов в поездах различных категорий;

$K_{уч}$ – количество маршрутов следования пассажирских поездов;

$K_{пф}$ – количество назначений;

- средняя дальность поездки пассажиров:

$$L = \frac{\sum AL}{\sum An} \quad (5)$$

$$L = \frac{1520}{95} = 16 \text{ km}$$

- средний состав поезда в вагонах:

$$m = \frac{\sum nL}{\sum NL} \text{ вагонов,}$$

$$m = \frac{480}{64} = 7.5 \text{ чел.}$$

Выводы

В заключении следует отметить, что время на обработку пассажирских поездов при прибытии и отправлении значительно сокращается если применить метод параллельного выполнения операций, не зависящих друг от друга. Также технология обработки пассажирских поездов строится на основе максимального сокращения времени на производство операций, минимальных затрат на обслуживание и экипировку составов, ускорения оборачиваемости составов и сокращения их числа. Исследуемая линия хоть и называется кольцевой, её реальное движение производится в виде двух полу-дуговых направлений Баку-Хырдалан-Сумгаит и Баку-Пиршаги-Сумгаит. Но что мешает ввести постоянное кольцевое движение? После разделения от грузовой станции Кишлы контейнерного парка почти все грузовые операции были переданы станции Сумгаит-Грузовая до тех пор, пока не будет готова станция З.Тагиев-Грузовая. Плюс ко всему, эта станция расположена в промышленном районе Сумгаитской зоны. Естественно, после такой нагрузки невозможно обеспечить постоянный бесперебойный проход длинно-маршрутных пассажирских составов через станцию Сумгаит-Грузовая. Если из станции Гюздек минуя пост №6 провести железнодорожную линию прямо на станцию Сумгаит-Пассажирская, на Апшеронской кольцевой железной дороге можно будет организовать интенсивное и качественное движение пассажирских поездов (рис. 2).



Рис. 2. График движения Апшеронской кольцевой железной дороги

ЛИТЕРАТУРА

1. Грунтов П.С Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте. Москва, «Транспорт», 1994, 543 с.
2. Кудрявцев В.А. Организация железнодорожных пассажирских перевозок. Москва, Издательский центр «Академия», 2013, 256 с.
3. Кочнев Ф.П., Сотников И.Б. Управление эксплуатационной работой железных дорог. Москва, «Транспорт», 1997, 424 с.
4. Ковалев А.В. Организация вагонного хозяйства. Учеб. иллюстр. пособие. Москва, УМЦ МПС России, 2007, с. 22–23.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ АПСШЕРОНСКОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Л.М.Гасратова

Резюме. В статье была исследована пассажирская станция 28 мая, был произведен полный анализ участка Баку-Сумгаит. Также были отмечены все необходимые элементы для построения графика движения пассажирских поездов. Технология работы пассажирских станций определяется категориями обслуживаемых поездов. Через пассажирскую станцию проходят пассажирские поезда дальние транзитные и своего формирования, местные и пригородные. Технология обработки этих поездов строится на основе максимального сокращения времени на производство операций, минимальных затрат на обслуживание и экипировку составов, ускорения оборачиваемости составов и сокращения их числа. Далее проанализирован план движения пассажирских перевозок и отмечены важные моменты при его построении.

При увязке основных элементов станции было обращено внимание на понятия темп и технологический интервал и рассчитаны по направлениям Баку-Хырдалан-Сумгаит и Баку-Пиршаги-Сумгаит. Исследования также показали, что реальное движение производится не в круговую, а в виде двух полу-дуговых направлений. Авторами было предложено провести железнодорожную линию Гюздек – Сумгаит-Пассажирская, которая обеспечит кольцевое движение на линии.

Ключевые слова: пассажирская станция, маршрут, расписание, поезд.

Accepted: 18.05.2026

SİS-9 OKTADEKAN VƏ TRİDEKAN TURŞULARININ TRİETANOLAMİN LƏ ƏMƏLƏ GƏTİRDİKLƏRİ KOMPLEKS DUZLARIN BAKTERİSİD XASSƏLƏRİNİN TƏDQIQI

Asya Fərhad qızı Şahverdiyeva^{1,2}

¹Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti, Bakı, Azərbaycan

²Azərbaycan Texniki Universiteti, Bakı, Azərbaycan

STUDY OF THE BACTERICIDAL PROPERTIES OF COMPLEX SALTS DERIVED FROM CIS-9-OCTADECENOIC AND TRIDECANOIC ACIDS AND TRIETHANOLAMINE

Asya Farhad Shahverdiyeva^{1,2}

¹Azerbaijan State Pedagogical University, Baku, Azerbaijan

²Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

sahverdiyeva.asya@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4984-3207>

Abstract. Corrosion is one of the major challenges facing the oil and gas industry, petrochemical enterprises, and many other industrial sectors, causing significant economic losses and environmental concerns. Microbiologically influenced corrosion, particularly that induced by sulfate-reducing bacteria, accelerates the degradation of metallic equipment and infrastructure. Therefore, the development of environmentally friendly and multifunctional corrosion inhibitors with high efficiency remains an important scientific and practical objective. In the present study, the bactericidal properties of quaternary ammonium salts synthesized through the interaction of cis-9-octadecenoic acid and tridecanoic acid with triethanolamine were investigated. The bactericidal activity of the synthesized compounds was evaluated using solutions of different concentrations in order to determine the relationship between concentration and antimicrobial effectiveness. The sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio desulfuricans* strain 1143, isolated from the Absheron–Binagadi oil field, was selected as the test microorganism. Experimental results demonstrated that the investigated compounds significantly inhibited bacterial growth and that their bactericidal activity increased with increasing concentration. The findings indicate that the synthesized quaternary ammonium salts possess promising antimicrobial properties and may be considered potential multifunctional agents for simultaneous corrosion protection and microbial control in petroleum industry applications.

Keywords: corrosion, bactericidal activity, triethanolamine, carboxylic acids, sulfate-reducing bacteria.

© 2026 Azerbaijan Technical University. All rights reserved.

1. GİRİŞ

Metalların korroziyası müasir sənayenin, xüsusilə neft-qaz və neft-kimya sektorunun qarşılaşdığı ən mühüm elmi-texniki problemlərdən biridir. Korroziya nəticəsində avadanlıqların istismar müddəti azalır, texnoloji proseslərin etibarlılığı zəifləyir, təmir və yenidənqurma xərcləri artır, həmçinin ətraf mühit üçün potensial təhlükələr yaranır. Dünyada hər il korroziya ilə bağlı iqtisadi itkilərin milyardlarla dollar həcmində olduğu qeyd edilir ki, bu da problemin qlobal xarakter daşdığını göstərir.

Neft hasilatı, nəqli və emalı proseslərində korroziyanın inkişafına təsir göstərən amillər sırasında mikrobioloji korroziya xüsusi yer tutur [1, 2]. Mikroorqanizmlərin fəaliyyəti nəticəsində yaranan korroziya prosesləri ənənəvi elektrokimyəvi korroziya ilə müqayisədə daha intensiv xarakter daşıyır və metal konstruksiyaların lokal zədələnməsinə səbəb olur. Bu baxımdan sulfat reduksiyaedici bakteriyalar, xüsusilə *Desulfovibrio desulfuricans* növü mikrobioloji korroziyanın əsas törədicilərindən biri hesab edilir. Həmin bakteriyalar həyat fəaliyyəti nəticəsində hidrogen-sulfid və digər aqressiv metabolitlər əmələ gətirərək metal səthlərində korroziya proseslərini sürətləndirirlər [3, 4].

Son illərdə həm korroziya inhibitoru, həm də bakterisid təsirə malik çoxfunksiyalı reagentlərin yaradılması istiqamətində geniş tədqiqatlar aparılır [4, 5]. Belə birləşmələr arasında dördlü ammonium duzları xüsusi maraq doğurur. Onların yüksək səthi aktivliyi, metal səthlərində adsorbsiya olunaraq qoruyucu təbəqə yaratmaq qabiliyyəti və geniş spektrli antimikrob təsiri bu sinif birləşmələrin neft sənayesində tətbiq perspektivlərini artırır.

Ədəbiyyat məlumatlarının təhlili göstərir ki, müxtəlif aminlər və ali karbon turşuları əsasında alınan dördlü ammonium birləşmələrinin korroziyadan mühafizə xüsusiyyətləri kifayət qədər

öyrənilmişdir [3–6]. Bununla belə, sis-9-oktadekan və tridekan turşularının trietanolaminlə qarşılıqlı təsiri nəticəsində əmələ gələn dördlü ammonium duzlarının bakterisid aktivliyi, xüsusilə sulfatreduksiyaedici bakteriyalara qarşı təsiri haqqında məlumatlar məhduddur. Bu sahədə mövcud elmi boşluq həmin birləşmələrin hərtərəfli tədqiqini zəruri edir.

Bu baxımdan sis-9-oktadekan və tridekan turşuları əsasında sintez edilmiş dördlü ammonium duzlarının bakterisid xassələrinin öyrənilməsi, onların mikrobioloji korroziyanın qarşısının alınmasında tətbiq imkanlarının qiymətləndirilməsi həm nəzəri, həm də praktiki baxımdan mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

2. TƏDQIQATIN MƏQSƏDİ VƏ MƏSƏLƏLƏRİN QOYULUŞU

Tədqiqat işinin məqsədi sis-9-oktadekan və tridekan turşularının trietanolaminlə qarşılıqlı təsiri nəticəsində alınmış dördlü ammonium duzlarının bakterisid xassələrinin öyrənilməsi, onların sulfatreduksiyaedici bakteriyalara qarşı təsir effektivliyinin qiymətləndirilməsi və neft sənayesində çoxfunksiyalı reagent kimi tətbiq perspektivlərinin müəyyən edilməsindən ibarətdir.

Qarşıya qoyulmuş məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı elmi vəzifələr müəyyən edilmişdir:

- sis-9-oktadekan və tridekan turşuları əsasında trietanolaminlə dördlü ammonium duzlarının sintez edilməsi;
- sintez edilmiş birləşmələrin müxtəlif qatılıqlı məhlullarının hazırlanması və onların fiziki-kimyəvi xüsusiyyətlərinin qiymətləndirilməsi;
- tədqiqat obyektini kimi seçilmiş *Desulfovibrio desulfuricans* 1143 ştamminin laboratoriya şəraitində becərilməsi və identifikasiyası;
- alınmış birləşmələrin müxtəlif qatılıqlarda bakterisid aktivliyinin eksperimental olaraq müəyyən edilməsi;
- bakterisid təsirin qatılıqdan asılılığının öyrənilməsi və effektiv qatılıq diapazonunun müəyyənləşdirilməsi;
- əldə edilmiş nəticələrin müqayisəli təhlilinin aparılması və tədqiq olunan birləşmələrin antimikrob təsir mexanizminin qiymətləndirilməsi;
- sintez edilmiş dördlü ammonium duzlarının mikrobioloji korroziyaya qarşı mübarizədə və korroziya inhibitoru kimi tətbiq perspektivlərinin əsaslandırılması.

Tədqiqatın elmi yeniliyi sis-9-oktadekan və tridekan turşularının trietanolamin əsasında alınmış yeni ammonium tərkibli birləşmələrinin sulfatreduksiyaedici bakteriyalara qarşı bakterisid aktivliyinin sistemli şəkildə öyrənilməsindən ibarətdir. İşin praktiki əhəmiyyəti isə neft hasilatı və nəqli sistemlərində mikrobioloji korroziyanın qarşısının alınması üçün yüksək effektivliyə malik, ekoloji cəhətdən daha təhlükəsiz və iqtisadi baxımdan səmərəli çoxfunksiyalı reagentlərin yaradılması imkanları ilə bağlıdır.

3. MƏSƏLƏLƏRİN HƏLLİ ÜSULLARI VƏ TƏDQIQATIN APROBASİYASI

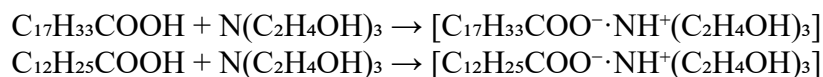
Tədqiqat işində sis-9-oktadekan və tridekan turşuları əsasında trietanolaminlə (TEA) qarşılıqlı təsir nəticəsində əmələ gələn ammonium tərkibli kompleks duzların sintezi, onların fiziki-kimyəvi xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi, səthi-aktivlik göstəricilərinin müəyyən edilməsi və bakterisid təsir potensialının qiymətləndirilməsi həyata keçirilmişdir.

Tədqiqat obyektini kimi uzun karbon zəncirinə malik birəsaslı doymuş karbon turşuları seçilmişdir. Tridekan turşusu ($C_{12}H_{25}COOH$) molyar kütləsi 214.4 q/mol olan doymuş alifatik birəsaslı karbon turşu olub, 41–42°C ərimə temperaturuna malikdir. Sis-9-oktadekan turşu ($C_{17}H_{33}COOH$) isə doymamış yağ turşusu olmaqla molyar kütləsi 282.5 q/mol, ərimə temperaturu 16.3°C və qaynama temperaturu 360°C-dir. Reaksiyalarda amin komponenti kimi molyar kütləsi 149.19 q/mol olan trietanolamindən (TEA) istifadə edilmişdir. Trietanolamin yüksək reaksiya qabiliyyətinə malik olmaqla yanaşı, korroziya inhibitorlarının və səthi-aktiv maddələrin sintezində geniş tətbiq olunur.

Kompleks duzların sintezi laboratoriya şəraitində ali karbon turşuları olan sis-9-oktadekan və tridekan turşuları ilə trietanolaminin ekvimolyar (1:1) nisbətdə qarşılıqlı təsiri əsasında həyata

keçirilmişdir. Sis-9-oktadekenoik turşunun trietanolaminlə reaksiyası 25–30°C temperaturda, intensiv qarışdırılmaqla 3–4 saat müddətində aparılmışdır. Tridekan turşusunun trietanolaminlə qarşılıqlı təsiri isə turşunun daha yüksək ərimə temperaturu nəzərə alınaraq 45°C temperaturda eyni müddətdə həyata keçirilmişdir. Reaksiya nəticəsində protonun turşudan aminə keçməsi hesabına ammonium-karboksilat tipli komplekslər əmələ gəlmişdir.

Reaksiyaların ümumi sxemi aşağıdakı kimidir:



Hesablamalar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, tridekan turşusu və sis-9-oktadekan turşunun trietanolaminlə əmələ gətirdiyi kompleks duzların nisbi molekül kütlələri müvafiq olaraq 363.6 q/mol və 431.7 q/mol təşkil edir. Bu dördlü ammonium duzlarının nəzəri element tərkibi molekulyar formullar əsasında hesablanmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, tridekan turşusu əsasında alınmış kompleks duzda karbon, hidrogen, oksigen və azotun kütlə payları müvafiq olaraq 62.7%; 11.3%; 22.1% və 3.9%, sis-9-oktadekan turşu əsasında alınmış kompleks duzda isə 66.7%; 11.4%; 18.6% və 3.3% təşkil edir. Müqayisəli təhlil göstərmişdir ki, karbon zəncirinin uzunluğunun artması kompleks duzda karbonun xüsusi payının yüksəlməsinə və onun hidrofob xüsusiyyətlərinin güclənməsinə səbəb olur.

Sintez edilmiş birləşmələrin səthi-aktiv xassələri Du Nüi halqası metodu ilə KSV Sigma 702 markalı tensiometr vasitəsilə tədqiq edilmişdir. Ölçmələr su–hava sərhədində 21°C temperaturda müxtəlif qatılıqlı məhlullardan istifadə etməklə aparılmışdır. Tədqiqat nəticələri göstərmişdir ki, hər iki birləşmə yüksək səthi-aktivlik nümayiş etdirərək suyun səthi gərilməsini 71.98 mN/m-dən müvafiq olaraq 24 və 23 mN/m qiymətlərinə qədər azaldır. Bu göstəricilər sintez edilmiş maddələrin effektiv adsorbsiya qabiliyyətinə malik olduğunu və fazalararası sərhəddə dayanıqlı qoruyucu təbəqə yaratmaq potensialını təsdiq edir.

Aparılmış müqayisəli analiz göstərmişdir ki, sis-9-oktadekan turşunun TEA əsasında alınmış kompleks duzu daha yüksək səthi-aktivlik nümayiş etdirir. Bu hal molekulda daha uzun hidrofob karbon zəncirinin mövcudluğu ilə izah olunur. Karbon zəncirinin uzunluğunun artması molekulların fazalararası sərhəddə daha sıx adsorbsiyasına səbəb olur ki, bu da səthi gərilmənin daha effektiv azalması ilə nəticələnir.

Tədqiqatın aprobeşiyası məqsədilə sintez edilmiş kompleks duzların müxtəlif qatılıqlı məhlulları sulfatreduksiyaedici bakteriyalar üzərində sınaqdan keçirilmiş və onların bakterisid aktivliyinin qiymətləndirilməsi aparılmışdır. Eksperimental nəticələr göstərmişdir ki, tədqiq olunan birləşmələr mikroorqanizmlərin inkişafını effektiv şəkildə zəiflədir və qatılığın artması ilə bakterisid təsir güclənir. Alınmış nəticələr göstərir ki, sis-9-oktadekan və tridekan turşularının TEA əsasında sintez edilmiş dördlü ammonium duzları yalnız səthi-aktiv maddə kimi deyil, həm də mikrobioloji korroziyanın qarşısının alınmasında tətbiq imkanlarını qiymətləndirmək olduğundan, onların molekulyar quruluşu ilə funksional xüsusiyyətləri arasındakı əlaqələrin müəyyənləşdirilməsinə xüsusi diqqət yetirilmişdir.

4. ALINAN NƏTİCƏLƏRİN TƏDQIQI VƏ MÜZAKİRƏSİ

Sis-9-oktadekan və tridekan turşularının trietanolaminlə qarşılıqlı təsiri nəticəsində sintez edilmiş ammonium-karboksilat tipli kompleks duzların fiziki-kimyəvi və funksional xüsusiyyətlərinin tədqiqi göstərmişdir ki, alınan birləşmələr yüksək səthi-aktivlik və perspektivli bakterisid xassələrə malikdirlər. Tədqiqatın əsas məqsədi bu birləşmələrin neft sənayesində mikrobioloji korroziyanın qarşısının alınmasında tətbiq imkanlarını qiymətləndirmək olduğundan, onların molekulyar quruluşu ilə funksional xüsusiyyətləri arasındakı əlaqələrin müəyyənləşdirilməsinə xüsusi diqqət yetirilmişdir.

Hesablama üsulu ilə müəyyən edilmiş element tərkibinin müqayisəli təhlili göstərmişdir ki, sis-9-oktadekan turşusu və TEA əsasında alınmış kompleks duzda karbonun kütlə payı (66.7%) tridekan

turşusu və TEA əsasında alınmış kompleks duzla müqayisədə (62.7%) daha yüksəkdir. Bu fərq ilk növbədə sis-9-oktadekan turşunun daha uzun karbon zəncirinə malik olması ilə əlaqədardır. Uzun hidrofob zəncir molekulun səthi aktivlik xüsusiyyətlərini gücləndirərək fazalararası sərhəddə daha sıx adsorbsiya olunmasına şərait yaradır. Nəticədə molekulların su–hava sərhədində oriyentasiyası yaxşılaşır və səthi gərilmənin azalması daha effektiv şəkildə baş verir.

Həllolma qabiliyyətinin sistemli tədqiqi göstərmişdir ki, sis-9-oktadekan və tridekan turşularının trietanolin (TEA) əsasında sintez edilmiş dördlü ammonium duzları etil spirti və izopropil spirtində yüksək həllolma nümayiş etdirir. Bu müşahidə onların orta polyar həlledicilərlə effektiv qarşılıqlı təsire girməsi və homogen məhlullar əmələ gətirməsi ilə izah olunur.

Molekulyar quruluş baxımından bu birləşmələrdə hidrofily (ammonium-karboksilat ion cütü) və hidrofob (uzun alkil zənciri) fraqmentlərin birgə mövcudluğu onların amfifil xarakter daşmasına səbəb olur. Nəticədə, spirt tipli həlledicilərdə həm ion-dipol qarşılıqlı təsirləri, həm də Van-der-Vaals tipli molekulyar qarşılıqlı təsirlər güclənir ki, bu da yüksək həllolma qabiliyyətini təmin edir.

Müəyyən edilmiş bu xüsusiyyət sintez olunmuş birləşmələrin texnoloji baxımdan tətbiq imkanlarını genişləndirir. Xüsusilə onların spirt mühitində stabil məhlullar əmələ gətirməsi neft-kimya sistemlərində, korroziya inhibitor tərkiblərinin hazırlanmasında və səthi-aktiv kompozisiyaların formulasiya proseslərində homogen dispers sistemlərin əldə olunmasını asanlaşdırır. Bu isə reagentlərin metal səthlərdə bərabər paylanmasını və funksional təsirin effektivliyini artıran mühüm amil kimi çıxış edir.

Xüsusilə sis-9-oktadekan turşusu və TEA əsasında alınmış kompleks duzun aşağı qatılıqlarda su ilə kolloid sistem əmələ gətirməsi onun dispersləşdirici və emulqator xüsusiyyətlərə malik olduğunu göstərir. Belə xüsusiyyətlər neft-mədən sistemlərində reagentlərin bərabər paylanması və metal səthlərində effektiv qoruyucu təbəqənin formalaşması üçün vacib amillərdəndir.

Səthi aktivlik göstəricilərinin təhlili zamanı müəyyən edilmişdir ki, hər iki kompleks duzun suyun səthi gərilməsinə əhəmiyyətli dərəcədə azaldır. İlkin səthi gərilmə qiyməti olan 71.98 mN/m-dən tridekan turşusu və TEA əsasında alınmış kompleks duz üçün 24 mN/m-ə, sis-9-oktadekan turşusu və TEA əsasında alınmış kompleks duz üçün isə 23 mN/m-ə qədər azalma müşahidə edilmişdir. Bu nəticələr sintez edilmiş maddələrin yüksək səthi-aktiv reagentlər sinfinə aid olduğunu göstərir. Əldə olunan göstəricilər bir çox sənaye səthi-aktiv maddələrinin parametrləri ilə müqayisə oluna biləcək səviyyədədir.

Sis-9-oktadekan və tridekan turşuları və TEA əsasında alınan kompleks duzların səthi aktivliyinin müqayisəsi göstərmişdir ki, karbon zəncirinin uzunluğunun artması və molekulda hidrofob hissənin üstünlük təşkil etməsi səthi gərilmənin daha effektiv azalmasına səbəb olur. Bu qanunauyğunluq səthi-aktiv maddələrin adsorbsiya nəzəriyyəsi ilə uyğunluq təşkil edir və alınmış nəticələrin nəzəri əsaslandırılmasını təmin edir.

Bakterisid təsirin qiymətləndirilməsi zamanı müəyyən edilmişdir ki, hər iki kompleks duz sulfatreduksiyaedici bakteriyalara qarşı nəzərəçarpacaq aktivlik nümayiş etdirir. Tədqiq olunan məhlulların qatılığı artdıqca bakterial hüceyrələrin inkişaf intensivliyi azalır və bakterisid təsir güclənir. Bu hadisə ammonium qrupu daşıyan birləşmələrin bakteriya hüceyrə membranları ilə elektrostatik qarşılıqlı təsiri nəticəsində membranın keçiriciliyinin pozulması və hüceyrədaxili metabolik proseslərin zəifləməsi ilə izah edilə bilər.

Müəyyən edilmişdir ki, sis-9-oktadekan turşusu və TEA əsasında alınmış kompleks duz daha yüksək bakterisid aktivlik nümayiş etdirir. Bu hal onun daha yüksək hidrofobluğa malik olması və bakterial membranlarla daha effektiv qarşılıqlı təsir göstərməsi ilə əlaqələndirilə bilər. Məlumdur ki, uzun karbon zəncirli ammonium tərkibli birləşmələr mikroorqanizmlərin lipid təbəqəsinə daha asan daxil olaraq onların struktur bütövlüyünü pozur və nəticədə hüceyrənin məhvinə səbəb olur.

Beləliklə, aparılmış tədqiqatlar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, sintez edilmiş kompleks duzlar həm yüksək səthi-aktivlik, həm də bakterisid təsir nümayiş etdirir. Bu isə onların mikrobioloji korroziyanın qarşısının alınması üçün çoxfunksiyalı reagentlər kimi istifadəsinə əsas yaradır (cədvəl).

Tridekan və sis-9 oktadekan turşularının TEA ilə əmələ gətirdikləri dördlü ammonium duzlarının müxəlif qatılıqlı məhlullarının qatılıqdan asılı olaraq bakterisid effektinin nəticələri

Komplekslərin şərti adı və tərkibi	Maddənin qatılığı, C-mq/l	Bakteriyaların sayı (hüceyrə sayı/ml)	H ₂ S miqdarı, mq/l	Bakterisid effekti, Z-%
Tridekan turşusu+TEA	100	106	212.5	38
	150	103	93.5	73
	250	–	–	100
Sis -9 oktadekan turşusu+TEA	100	–	–	100
	150	–	–	100
	250	–	–	100
Nəzarət-I SRB-siz mühitdə H ₂ S-in miqdarı	24 mq/l			
Nəzarət-II SRB-li mühitdə H ₂ S-in miqdarı	340 mq/l			
Nəzarət-III-Qidalı mühitdə bakteriyaların sayı	108 hüceyrə sayı/ml			

5. NƏTİCƏLƏR

Aparılmış tədqiqatlar nəticəsində sis-9-oktadekan və tridekan turşularının trietanolaminlə qarşılıqlı təsiri əsasında yeni kompleks duzlar sintez edilmiş və onların fiziki-kimyəvi, səthi-aktiv və bakterisid xüsusiyyətləri öyrənilmişdir.

Müəyyən edilmişdir ki, sintez edilmiş kompleks duzların molekulyar quruluşu onların funksional xüsusiyyətlərinə əhəmiyyətli təsir göstərir. Sis-9-oktadekan turşusu və TEA əsasında alınmış kompleks duzda karbonun kütlə payının daha yüksək olması onun hidrofobluğunu artırmış və nəticədə daha yüksək səthi-aktivlik nümayiş etdirməsinə səbəb olmuşdur.

Səthi gərilmənin ölçülməsi göstərmişdir ki, hər iki kompleks duzlarda su–hava sərhədində yüksək adsorbsiya qabiliyyətinə malikdir və suyun səthi gərilməsini 71.98 mN/m-dən 23–24 mN/m diapazonuna qədər azaldır. Bu göstəricilər onların effektiv səthi-aktiv maddələr (SAM) olduğunu təsdiq edir.

Bakterioloji sınaqlar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, sis-9-oktadekan və tridekan turşularının TEA sintez edilmiş kompleks duzları *Desulfovibrio desulfuricans* 1143 ştammina qarşı yüksək bakterisid aktivlik nümayiş etdirir. Bakterisid təsirin qatılıqdan asılı olaraq artması müəyyən edilmiş və daha yüksək qatılıqlarda mikroorqanizmlərin inkişafının əhəmiyyətli dərəcədə zəiflədiyini müşahidə olunmuşdur.

Müqayisəli təhlil göstərmişdir ki, sis-9-oktadekan turşusu və TEA əsasında alınmış kompleks duz həm səthi-aktivlik, həm də bakterisid təsir baxımından tridekan turşusu və TEA əsasında alınmış kompleks duzdan daha yüksək effektivliyə malikdir. Bu üstünlük onun molekulunda daha uzun hidrofob karbon zəncirinin olması ilə izah olunur.

Əldə edilmiş nəticələr göstərir ki, tədqiq olunan dördlü ammonium duzları mikrobioloji korroziyaya qarşı mübarizədə, neft-mədən avadanlıqlarının mühafizəsində və sulfatreduksiyaedici bakteriyaların inkişafının qarşısının alınmasında perspektivli çoxfunksiyalı reagentlər kimi istifadə oluna bilər. Gələcək tədqiqatlarda bu birləşmələrin korroziyadan mühafizə effektivliyinin real istismar şəraitində öyrənilməsi və onların təsir mexanizminin dərinləşdirilmiş şəkildə araşdırılması məqsəduyğun hesab edilir.

ƏDƏBİYYAT

1. Hernández Gayosso M.J., Nava N., Zavala Olivares G. Characterisation and comparison of corrosion products originated in steel pipelines transporting sour gas and crude oil. *The International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control*, 2016, Vol. 51, No. 8, p. 626–634.
2. Alagta A., Felhosi I., Bertoti I., Kalman E. Corrosion protection properties of hydroxamic acid self-assembled monolayer on carbon steel. *Corrosion Science*, 2008, Vol. 50, p. 1644–1649.
3. Эфендиева Л.М., Агамалиева Д.Б., Рустамли Г.Ю., Бабанлы Н.Н., Насибова Г.Г., Ахмедбекова С.Ф., Аббасов В.М. Исследование бактерицид-ингибиторных свойств аминоэфиров, полученных на основе синтетических нефтяных кислот. *Нефтепереработка и нефтехимия*, 2020, № 8, с. 13–16.
4. Agamaliyeva D.B., Abbasov M.M., Abbasov V.M., Aliyeva Kh.Kh. Synthesis of alkylamine complexes derived from maleic acids and study of bactericidal properties. *Journal of Anticorrosion Protection Practice*, 2022, Vol. 27, No. 1, p. 42–48.
5. Anandkumar B., George R.P., Maruthamuthu S., Parvathavarthini N., Mudali U.K. Corrosion characteristics of sulfate-reducing bacteria (SRB) and the role of molecular biology in SRB studies: an overview. *Corrosion Reviews*, 2016, Vol. 34, p. 41–63.
6. Quraishi M.A., Danish Jamal. Fatty Acid Triazoles: Novel Corrosion Inhibitors for Oil Well Steel (N-80) and Mild Steel. *JAOCs*, 2000, Vol. 77, No. 10, p. 1107–1113.

Accepted: 19.05.2026

Nəşriyyatın direktoru: *Xəlil Nəbiyev*
Dizayner: *Fuad Vəliyev*

Formatı: 60x84 ¹/₈
Həcmi: 10,75 ç.v.
Tirajı: 500

Jurnal AzTU Press Nəşriyyatının mətbəəsində çap olunmuşdur.

