

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

MAŞIN ÖYRƏTMƏSİ METODLARININ TƏTBİQ EDİLMƏSİLƏ MƏSAMƏLİ MÜHİTİN KOLMATASIYASININ PROQNOZLAŞDIRILMASI

İxtisas: 2525.01 - Neft və qaz yataqlarının
işlənməsi və istismarı

Elm sahəsi: Texnika elmləri

İddiaçı: **Timur Elmanoviç Abdulmutalibov**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2026

Dissertasiya işi Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti PHŞ-nin "Neft-qaz mühəndisliyi" kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: Texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
Yelena Yevgenyevna Şmonçeva

Rəsmi opponentlər: Texnika elmləri doktoru, dosent
Nahidə İsmət qızı Hüseynova

Texnika elmləri doktoru, dosent
Mübariz Sevdimalı oğlu Xəlilov

Texnika üzrə fəlsəfə doktoru
Ülviyyə Tahir qızı Əhmədova

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən FD 2.03 Dissertasiya şurası

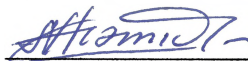
Dissertasiya şurasının Texnika elmləri doktoru, professor
sədri:


Elman Xeyrulla oğlu İskəndərov

Dissertasiya şurasının Texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
elmi katibi:


Güllü Valeh qızı Cabbarova

Elmi seminarın sədri: Texnika elmləri doktoru, dosent


Natiq Neyman oğlu Həmidov

İmzaları təsdiq edirəm:

ADNSU-nun Elmi katibi, texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent


İncilab Namiq oğlu Əliyev



İŞİN ÜMUMİ SƏCİYYƏSİ

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Layın quyudibi zonasındakı məsaməli mühitin kolmatasiya olunması lay ilə quyu arasındakı süzülmə əlaqəsinin pisləşməsinin ən geniş yayılmış səbəblərindən biridir. Bərk hissəciklərin toplanması, mineral və üzvi çöküntülərin yaranması, xırda dispers fazanın miqrasiyası, süzgəc qabığının formalaşması, islanma qabiliyyətinin dəyişməsi və bioloji proseslərin inkişafı məsamə kanallarının effektiv kəsiyini azaldır. Nəticədə hidrodinamik müqavimət artır, keçiricilik azalır, hasilat quyularının məhsuldarlığı və vurucu quyuların qəbuletmə qabiliyyəti pisləşir.

Problemin praktiki mürəkkəbliyi ondan ibarətdir ki, kolmatasiya tədricən inkişaf edir və ilkin mərhələdə nadir hallarda birmənalı tanınan pozuntu kimi özünü göstərir. Mədən məlumatlarında bu proses dolayı yolla — debitin, təzyiqin, sululuğun, qaz amilinin, məhsuldarlıq əmsalının, qəbuletmə qabiliyyətinin, təzyiq düşküünün və quyudibi zonada əlavə müqavimətin dəyişməsi ilə əks olunur. Oxşar dəyişikliklər layın tükənməsi, iş rejiminin dəyişməsi, quyunun dayanması, faza çevrilmələri və texnoloji təsirlər nəticəsində də yarana bilər. Buna görə ayrıca bir göstərici kolmatasiya üçün kifayət qədər sübut sayıla bilməz; bir neçə əlamət və istismar tarixçəsi birlikdə şərh edilməlidir.

Kernin laboratoriya tədqiqatları, quyuların hidrodinamik tədqiqatları, təzyiqin bərpası əyrisinin təhlili və skin-faktorun qiymətləndirilməsi lay zədələnməsini diaqnostika etməyə imkan verir, lakin adətən artıq formalaşmış vəziyyəti xarakterizə edir. Məhsuldarlığın davamlı itkisinin qarşısını almaq üçün retrospektiv diaqnostikadan riskin erkən qiymətləndirilməsinə keçmək lazımdır. Bu yanaşma hər bir obyekt üzrə tez-tez xüsusi tədqiqatların aparılmasının iqtisadi və təşkilati səbəblərlə məhdud olduğu böyük quyu fondu üçün xüsusilə vacibdir.

Müasir mədən uçotu sistemləri böyük həcmdə zaman sıraları formalaşdırır. Bu məlumatların maşın öyrətməsi metodları ilə birgə istifadəsi süzülmə xassələrinin pisləşməsindən əvvəl yaranan parametrlərin kombinasiyalarını aşkar etməyə imkan verir. Lakin prosesin zaman istiqaməti, əlamətlərin fiziki mənası və ilkin məlumatların keyfiyyəti

nəzərə alınmadan alqoritmlərin birbaşa tətbiqi dəqiqliyin şişirdilmiş qiymətinə səbəb ola bilər. Elmi məsələ yalnız alqoritmin seçilməsindən deyil, fiziki cəhətdən əsaslandırılmış hədəf dəyişənin, səbəb baxımından düzgün əlamətlər fəzasının, zaman üzrə yoxlama sxeminin və mühəndis üçün anlaşılan ehtimal şərhinin formalaşdırılmasından ibarətdir.

Aparılmış tədqiqatların təhlili göstərmişdir ki, lay zədələnməsi mexanizmləri və diaqnostika üsulları kifayət qədər geniş öyrənilmiş, maşın öyrətməsi metodları isə debitin, təzyiqin, mürəkkəbləşmələrin və texnoloji göstəricilərin proqnozlaşdırılmasında fəal tətbiq olunur. Bununla yanaşı, mədən zaman sıralarını, quyudibi zonanın diaqnostik parametrlərini, kolmatasiya riskinin erkən proqnozunu və nəticələrin mühəndis tətbiqi qaydasını birləşdirən vahid metodologiya kifayət qədər işlənməmişdir. Bu hal dissertasiya işinin aktuallığını müəyyən edir.

Nəşr olunmuş işlərdə kolmatasiya prosesinin fiziki modelləri adətən hissəciklərin daşınmasını və tutulmasını, məsaməliliyin və keçiriciliyin dəyişməsinə, çöküntülərin və əlavə hidrodinamik müqavimətin yaranmasını təsvir edir. Bu modellərin üstünlüyü səbəb-nəticə baxımından şərh edilə bilməsidir, lakin praktiki tətbiq üçün adi istismar zamanı nadir hallarda ölçülən məsamə fəzası parametrləri, kinetik əmsallar və hissəcik xassələri tələb olunur. Statistik və hesablama-analitik üsulları mədən məlumatlarına tətbiq etmək daha asandır, lakin onlar əsasən artıq baş vermiş kənarlaşmanı qeydə alır. Maşın öyrətməsi çoxölçülü və qeyri-xətti dinamikəni nəzərə ala bilər, amma zaman üzrə yoxlama və əlamətlərə mühəndis məhdudiyyətləri olmadan keyfiyyəti şişirdilmiş göstərə bilər.

Buna görə dissertasiyada kombinə edilmiş yanaşma qəbul olunmuşdur. Fiziki təsəvvürlər diaqnostik göstəricilərin seçilməsi və nəticənin izahı üçün, mədən zaman sıraları isə proqnostik əlamətlərin formalaşdırılması üçün istifadə edilir. Bu yanaşma debitin azalmasını kolmatasiya ilə əyniləşdirmir və hesablanmış siqnalı yekun diaqnoz kimi qəbul etmir. Onun təyinatı istismar tarixçəsi, iş rejimi, quyu tədqiqatlarının məlumatları və quyudibi zonanın vəziyyəti əsasında yoxlanılmalı olan davamlı dəyişiklik kombinasiyasını erkən aşkar etməkdir.

Bu yanaşmanın mühüm xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, modelin nəticəsi ayrıca götürülmüş texnoloji parametr kimi deyil, quyunun iş tarixçəsi ilə birlikdə qiymətləndirilən risk signalı kimi qəbul olunur. Kolmatasiya prosesinin ilkin mərhələsində debit, təzyiq, qaz amili və sululuq göstəricilərinin dəyişməsi çox vaxt zəif və qeyri-sabit olur. Buna görə proqnoz yalnız bir parametrin kəskin dəyişməsinə deyil, bir neçə göstəricinin zaman üzrə uyğun dinamikasına əsaslanmalıdır. Belə yanaşma həm yalnız diaqnostika riskini azaldır, həm də mühəndisə hansı parametr qrupunun əlavə yoxlama tələb etdiyini göstərir.

Dissertasiyada qəbul edilən risk anlayışı klassik diaqnostikanı əvəz etmir. Əksinə, hidrodinamik tədqiqatların, rejim məlumatlarının və quyudibi zonanın vəziyyətinin daha məqsədli təhlilinə şərait yaradır. Bu xüsusiyyət böyük quyu fondu üçün vacibdir, çünki bütün quyular üzrə eyni tezlikdə xüsusi tədqiqat aparmaq praktik cəhətdən mümkün olmur. Riskin erkən qiymətləndirilməsi isə diqqəti əvvəlcə daha problemli obyektlərə yönəltməyə və əlavə tədqiqatların ardıcılığını əsaslandırmağa imkan verir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. İşin məqsədi neft və qaz yataqlarının işlənməsi və istismarı zamanı quyuların vəziyyətinə nəzarətin səmərəliliyini artırmaq və texnoloji qərarları əsaslandırmaq üçün mədən zaman sıraları və maşın öyrətməsi metodları əsasında layın quyudibi zonasındakı məsaməli mühitin kolmatasiya riskinin erkən proqnozlaşdırılması metodologiyasını işləyib hazırlamaq və yoxlamaqdır.

Məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı vəzifələr həll edilmişdir:

1. kolmatasiya mexanizmləri təhlil edilmiş, onların kollektorun süzülmə-tutum xassələrinə, hasilat quyularının məhsuldarlığına və vurucu quyuların qəbuletmə qabiliyyətinə təsiri müəyyənləşdirilmişdir;

2. quyudibi zonanın vəziyyətini xarakterizə edən, keçiricilik, skin-faktor, lay təzyiqi, məhsuldarlıq əmsali, qəbuletmə qabiliyyəti, təzyiq düşküsu və törəmə rejim göstəricilərini əhatə edən diaqnostik parametrlər sistemi əsaslandırılmışdır;

3. quyunun iş dinamikasını və süzülmə xüsusiyyətlərinin dəyişməsinə əks etdirən mədən zaman sıraları bazası formalaşdırılmışdır;

4. quyunun faktiki məhsuldarlığını onun hesabi potensialı ilə əlaqələndirən kolmatasiya indeksi işlənmişdir;

5. gecikmə parametrləri, sürüşən statistikalar, dəyişmə templəri və rejim nisbətləri nəzərə alınmaqla səbəb baxımından düzgün əlamətlər fəzası formalaşdırılmışdır;

6. namizəd modellər seçilmiş və zaman üzrə yoxlanılmış, yekun proqnostik konveyer üçün 14 sutkalıq üfüqdə $IC < 0,90$ hadisəsini proqnozlaşdıran L1-nizamlanmış logistik reqressiya seçilmişdir;

7. müstəqil G12 test dövrü və G09 xarici seçməsi əsasında yekun modelin sıralama qabiliyyəti, kalibrənməsi, həssaslığı və quyulararası köçürülə bilməsi qiymətləndirilmişdir;

8. quyu fondunun monitorinqində proqnozdan istifadə və mühəndis yoxlaması tələb edən siqnalların formalaşdırılması üçün praktiki qayda işlənmişdir.

Tədqiqat obyektı. Quyu dibi zonasının süzülmə xassələrinin pisləşdiyi neft-qaz yataqlarının hasilat və vurucu quyuları.

Tədqiqat predmeti. Mədən zaman sıralarının təhlili əsasında diaqnostik göstəricilərin formalaşdırılması və məsələli mühitin kolmatasiya riskinin proqnozlaşdırılması üsulları.

Tədqiqat metodları. Mədən və hidrodinamik təhlil, statistik və korrelyasiya təhlili, səbəb baxımından düzgün əlamətlərin formalaşdırılması, L1 və L2 nizamlanmış logistik reqressiya, xətti dayaq vektorları üsulu və təsadüfi meşə tətbiq edilmişdir. İki 30 sutkalıq qoruyucu interval ilə xronoloji bölünmə, genişlənən təlim pəncərəsi ilə sürüşən zaman yoxlaması (rolling-origin), median imputasiya, roblast miqyaslandırma, siniflərin avtomatik balanslaşdırılması, Platt üsulu ilə ehtimalların kalibrənməsi, ablyasiya təhlili, bloklu butstrep və ayrı-ayrı proqnozların lokal şərhə istifadə olunmuşdur.

Məlumatların emalında əsas tələb zaman səbəbiyyətinin qorunması olmuşdur. t proqnoz tarixi üçün yalnız həmin tarixədək mövcud məlumatlardan istifadə edilmiş, hədəf dəyişən isə gələcək (t ; $t+14$) intervalında müəyyən edilmişdir. Yekun model konfigurasiyası,

kalibrator və istismar həddi təlim və validasiya hissələrində seçilmiş, test seçməsi sazlama üçün istifadə olunmamışdır.

Nəticələrin etibarlılığı faktiki mədən məlumatları, parametrlərin fiziki uyğunluq nəzarəti, gələcək hadisənin sərt işarələnməsi, qoruyucu intervallarla xronoloji bölünmə, G12 üzrə müstəqil test seçməsi, namizəd modellərin müqayisəsi, ardıcıl zaman alt-dövrələrinin təhlili, bloklu qeyri-müəyyənlik qiymətləndirilməsi və G12-də sabitləşdirilmiş konveyerin G09-da təkrar öyrətmədən xarici yoxlanması ilə təmin edilir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. Mədən zaman sıralarını, diaqnostik parametrləri və ehtimal modelini birləşdirən kolmatasiya riskinin erkən proqnozlaşdırılması metodologiyası.

2. Quyunun faktiki məhsuldarlığının hesabi potensialdan kənarlaşmasını mühəndis baxımından şərh etməyə imkan verən kolmatasiya indeksi.

3. Yalnız proqnoz anında mövcud olan məlumatlardan formalaşdırılan səbəb baxımından düzgün əlamətlər fəzası.

4. Platt kalibrleməsi və $FPR \leq 0,15$ şərti ilə validasiyanın hadisəöncəsi hissəsində seçilmiş istismar həddi olan yekun L1-nizamlanmış logistik model.

5. Ablyasiya təhlili, sıfırdan fərqli əmsallar, əlamətlərin lokal töhfələri və ardıcıl zaman alt-dövrələrində yoxlama əsasında modelin dayanıqlığının və mühəndis şərhinin qiymətləndirilməsi yanaşması.

6. Məlumatlara nəzarət, 19 əlamətin hesablanması, kalibrlemiş ehtimalın alınması, xəbərdarlığın formalaşdırılması və məcburi mühəndis yoxlamasını əhatə edən gündəlik tətbiq və köçürmə qaydası.

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

1. Sərt hədəf dəyişən sxemi təklif edilmişdir: kolmatasiya indeksi gələcək $(t; t+14]$ intervalında 0,90-dan aşağı düşdükdə hadisə qeydə alınır; cari tarix və bütün gələcək məlumatlar əlamətlərdən tam çıxarılır.

2. İstismar rejimini, neft, qaz və su debitlərini, sululuğu, qaz nisbətlerini, hesabi potensialı, cari və əvvəlki IC-ni, IC dəyişməsinə və müşahidələrin qeyri-müntəzəmliyini birləşdirən 19 səbəb baxımından yol verilən əlamətdən ibarət kompakt dəst formalaşdırılmışdır.

3. Məhdud zaman sırası şəraitində əmsalların daxili seyrəkləşdirilməsini, ehtimal çıxışını və birbaşa mühəndis şərhini təmin etdiyinə görə $C = 0,1$ olan L1-nizamlanmış logistik reqressiyanın yekun model kimi seçilməsi əsaslandırılmışdır.

4. Modelin seçilməsi, Platt kalibrləməsi və validasiyanın hadisəöncəsi hissəsində istismar həddinin müəyyən edilməsi, sonra G12 üzrə müstəqil test və G09 üzrə xarici köçürmə proseduru təklif edilmişdir.

5. Sıralama, kalibrləmə, əlamət tərkibinə həssaslıq, zaman qeyri-bircinsliyi və quyulararası köçürülmə birgə qiymətləndirilmiş, modelin praktiki tətbiq sərhədləri kəmiyyətə müəyyən edilmişdir.

Nəzəri və praktiki əhəmiyyət. Nəzəri əhəmiyyət kolmatasiya ilə bağlı pisləşmənin mühəndis baxımından şərh olunan IC indeksinin dinamikası ilə əlaqəli gələcək ehtimal hadisəsi kimi formallaşdırılmasından ibarətdir. Praktiki əhəmiyyət yanlış erkən xəbərdarlıqlara nəzarət etməklə 14 sutkalıq üfüqdə gündəlik risk sıralamasının aparılması imkanından ibarətdir.

Hazırlanmış konveyer mədən monitorinqində əlavə analitik modul kimi istifadə oluna bilər. Əsas $\tau^* = 0,4446$ həddi yoxlama üçün signal yaradır, lakin avtomatik diaqnoz və ya texnoloji təsir əmri deyil. Mühəndis xəbərdarlığı iş rejimi, ölçmələrin keyfiyyəti, debitlər, təzyiq, sululuq, qaz nisbətləri və əməliyyat tarixçəsi ilə müqayisə edir.

Praktiki tətbiq məlumatların gündəlik yenilənməsini, sabit əlamət dəstinin hesablanması, təlim parametrləri ilə median imputasiya və miqyaslandırmanı, L1 modelinin skorunu, Platt kalibrləməsi, hədd ilə müqayisəni və xəbərdarlıqların jurnala yazılmasını nəzərdə tutur. Paylanmalar dəyişdikdə kalibrləmə izlənilir, hədd yoxlanılır və zərurət olduqda model yenidən öyrədilir.

İddiaçının şəxsi töhfəsi. Məsələnin qoyuluşu, kolmatasiya mexanizmlərinin sistemləşdirilməsi, ilkin mədən məlumatlarının hazırlanması və birləşdirilməsi, kolmatasiya indeksinin hesablanması, zaman əlamətlərinin və hədəf dəyişənlərin formalaşdırılması, modellərin qurulması və yoxlanması, nəticələrin şərhə və istismar qaydasının işlənməsi iddiaçı tərəfindən yerinə yetirilmişdir. Həmmüəllifli işlərdə məlumatların təhlili, əsas hesablamalar və

dissertasiya mövzusu üzrə nəticələrin ümumiləşdirilməsi iddiaçıya məxsusdur.

İşin yerinə yetirildiyi təşkilat. Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin “Neft-qaz mühəndisliyi” kafedrası.

İşin aprobasiyası. Tədqiqatın əsas müddəaları və nəticələri aşağıdakı elmi tədbirlərdə məruzə və müzakirə edilmişdir:

1. Ufa Dövlət Neft Texniki Universitetinin 75 illiyinə həsr olunmuş “Neft-qaz işində müasir texnologiyalar – 2023” Beynəlxalq elmi-texniki konfransı, Ufa, 2023;

2. “Bulatov oxuları” VII Beynəlxalq elmi-praktiki konfransı, Krasnodar, 2023;

3. Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 100 illiyinə həsr olunmuş gənc tədqiqatçı və doktorantların Respublika elmi konfransı, Bakı, 4–5 may 2023;

4. “Neft-qaz işi, texnosfer təhlükəsizliyi və təbii ehtiyatlardan səmərəli istifadə: müasir reallıqlar” VI Ümumrusiya elmi-praktiki konfransı, Mahaçqala, 16–17 may 2023;

5. “Heydər Əliyev və Azərbaycanın neft strategiyası: neft-qaz geologiyası və geotexnologiyalarının nailiyyətləri” elmi-praktiki konfransı, Bakı, 23–26 may 2023;

6. Akademik A.X. Mirzəcanzadənin xatirəsinə həsr olunmuş “Yataqların işlənməsi texnologiyaları və neft-qaz hasilatında proseslərin modelləşdirilməsi” Beynəlxalq elmi-praktiki konfransı, Ufa, 2023;

7. SPE Caspian Technical Conference and Exhibition, Bakı, 21–23 noyabr 2023.

Nəşrlər. Dissertasiya mövzusu üzrə 11 elmi əsər, o cümlədən 4 elmi məqalə, 6 konfrans materialı və 1 Avrasiya patenti dərc edilmişdir. İki məqalə eyni zamanda Scopus və Web of Science bazalarında indeksləşdirilən jurnallarda, bir iş isə Scopus bazasında indeksləşdirilən konfrans materiallarında dərc olunmuşdur.

Dissertasiyanın quruluşu və həcmi. İş girişdən, dörd fəsildən, nəticələrdən, istifadə olunmuş ədəbiyyat siyahısından və iki əlavədən ibarətdir. İşə 9 şəkil, 25 qrafik, 51 cədvəl, 150 adda istifadə olunmuş ədəbiyyat siyahısı və 2 əlavə daxildir. Dissertasiya işi üzrə işarələrin sayı aşağıdakı kimidir: giriş — 13 657, I fəsil — 52 546, II fəsil — 90

708, III fəsil — 41 856, IV fəsil — 33 121, nəticələr — 2334. İşarələrin ümumi sayı — 234 222.

İŞİN ƏSAS MƏZMUNU

Girişdə layın quyudibi zonasının kolmatasiya riskinin erkən proqnozlaşdırılmasının aktuallığı əsaslandırılmış, məqsəd və vəzifələr formalaşdırılmış, tədqiqatın obyektı, predmeti və metodları müəyyən edilmişdir. Göstərilmişdir ki, hədəf dəyişən fiziki cəhətdən əsaslandırıldıqda, zaman səbəbiyyəti ciddi qorunduqda və ehtimal nəticəsi aydın şərh edildikdə maşın öyrətməsi metodlarının tətbiqi mühəndis əhəmiyyəti daşıyır.

Birinci fəsildə məsaməli mühitin kolmatasiya olunması və quyudibi zonanın zədələnməsi barədə təsəvvürlər sistemləşdirilmişdir. “Kolmatasiya” termini məsamə kanallarının tutulması və ya daralması nəticəsində məsaməli mühitin buraxıcılıq qabiliyyətinin azalmasını xarakterizə edir, lay zədələnməsi isə məhsuldarlığın pisləşməsinin mexaniki, fiziki-kimyəvi, faza, istilik və geomekaniki səbəblərini əhatə edən daha geniş anlayışdır. Skin-faktor quyu yaxınlığındakı ümumi əlavə müqaviməti əks etdirir, lakin bu müqavimətin konkret mexanizmini müəyyən etmir.¹

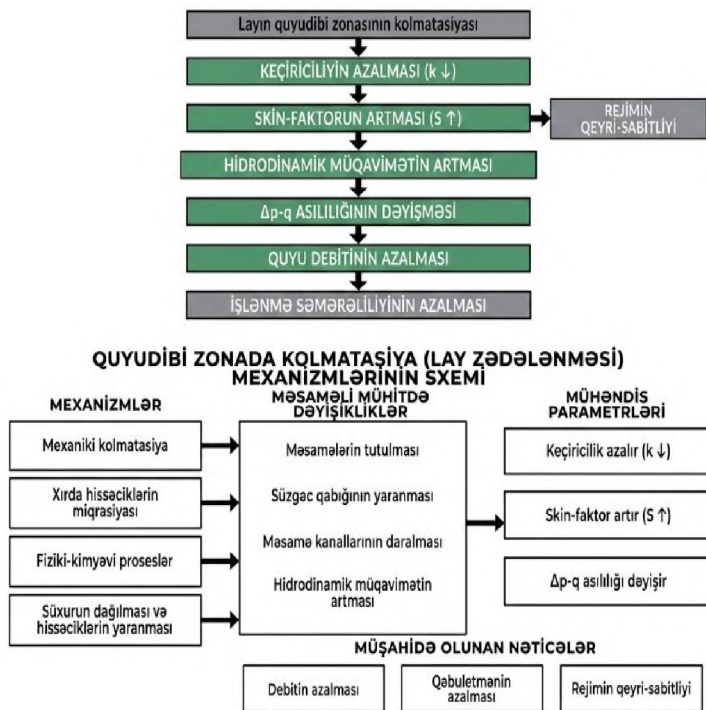
Mexaniki kolmatasiya hissəciklərin daxil olması və çökməsi, məsamə boğazlarında ələnməsi, körpü yaranması və xırda dispers fazanın miqراسiyası ilə əlaqədardır. Kimyəvi kolmatasiya duzların və uyğunsuz suların qarşılıqlı təsir məhsullarının çökməsi zamanı yaranır. Üzvi çöküntülərə asfaltenlər, qatranlar və parafinlər daxildir. Kolloid və emulsiya prosesləri dispers sistemin dayanıqlığı, duzluluq, turşuluq və flüidlərin tərkibi ilə müəyyən olunur. Bioloji kolmatasiya mikroorqanizmlərin artması və biofilmlərin yaranması nəticəsində inkişaf edir. Real layda bu mexanizmlər çox vaxt birlikdə təsir göstərir və bir-birini gücləndirir.²

Fəsildə hissəciklərin daşınması və çökməsi, dərinlik süzülməsi, keçiriciliyin dəyişməsi və əlavə müqavimət modelləri nəzərdən keçirilmişdir. Fiziki modellər səbəb-nəticə izahı verir, lakin mədən şəraitində həmişə mövcud olmayan parametrlər tələb edir.

¹ Civan F. Reservoir Formation Damage: Fundamentals, Modeling, Assessment, and Mitigation. 4th ed. Amsterdam: Elsevier, 2023.

² Khilar K.C., Fogler H.S. Migrations of Fines in Porous Media. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. DOI: 10.1007/978-94-017-0967-6.

Məlumatlara əsaslanan modellər qeyri-xətti əlaqələri aşkar edə bilər, amma nəticə işarələnmənin keyfiyyətindən, müşahidələrin sayından və yoxlamanın düzgünlüyündən asılıdır (şəkil 1).



Şəkil 1 – Kolmatasiyanın əsas mexanizmləri və onların süzülmə parametrləri ilə əlaqəsi

Buna görə hibrid yanaşma əsaslandırılmışdır: prosesin fizikası yol verilən əlamətləri, məhdudiyyətləri və hədəf dəyişənin mənasını müəyyən edir, maşın öyrətməsi isə gizli vəziyyəti və onun pisləşmə ehtimalını qiymətləndirir.

Mexanizmlərin təhlili göstərmişdir ki, eyni mədən təzahürləri müxtəlif səbəblərə malik ola bilər. Məhsuldarlığın azalması mexaniki tutulma, layın öz xırda dispers hissəciklərinin miqrasiyası, gil minerallarının şişməsi, duz və parafin çöküntüləri, emulsiya və ya su blokadası, həmçinin istismar rejiminin dəyişməsi ilə bağlı ola bilər. Buna görə diaqnoz bir parametmə əsaslanma bilməz. Səbəblərin

fərqləndirilməsi üçün debitin, təzyiqin, sululuğun, qaz amilinin, məhsuldarlıq əmsalının, qəbuletmə qabiliyyətinin və əlavə müqavimətin dinamikası, həmçinin təmirlər, işləmələr və rejim dəyişiklikləri birlikdə müqayisə edilməlidir.

Nəzərdən keçirilən diaqnostika üsulları birbaşa və dolayı üsullara ayrılmışdır. Birbaşa laboratoriya üsulları keçiriciliyin, məsamə fəzasının strukturunun, çöküntülərin tərkibinin və bərpa olunan keçiriciliyin dəyişməsinə qiymətləndirməyə imkan verir. Hidrodinamik quyu tədqiqatları və təzyiqin bərpası təhlili “lay–quyu” sisteminin integral qiymətini verir, lakin xüsusi əməliyyatlar tələb edir və fasiləsiz müşahidə təmin etmir. Mədən zaman sıraları diaqnostik baxımdan daha az birmənalıdır, lakin müntəzəm mövcud olduğu üçün erkən monitorinqə uyğundur. Bu əsasda tələb formalaşdırılmışdır: model risk ehtimalını qiymətləndirməli, yekun nəticə isə signal yoxlandıqdan sonra mühəndis tərəfindən verilməlidir.

Kern üzrə süzülmə sınaqları keçiriciliyin və bərpa olunan keçiriciliyin dəyişməsinə birbaşa müəyyən edir. Rentgen tomoqrafiyası, mikroskopiya və nüvə-mağnit rezonansı məsamə fəzasını və flüidlərin paylanması xarakterizə edir. Hidrodinamik tədqiqatlar “lay–quyu” sisteminin integral qiymətini verir. Mədən zaman sıraları xüsusi tədqiqatlarla müqayisədə fiziki şərhin birbaşılığına görə zəifdir, lakin fasiləsiz toplanma üstünlüyünə malikdir və quyu fondunun erkən skrininqi üçün istifadə oluna bilər.

Proqnozlaşdırma məsələsinə əsas tələblər müəyyən edilmişdir: hədəf dəyişən süzülmə əlaqəsinin pisləşməsinə əks etdirməli; əlamətlər proqnoz anında mövcud olmalı; təlim və yoxlama seçmələri xronoloji bölünməli; risk ehtimalı kalibrənməli; nəticə mühəndis izahı ilə müşayiət olunmalıdır. İcmal əsasında tədqiqatın ümumi ardıcılığı formalaşdırılmışdır: məlumatların hazırlanması – diaqnostik indeks – zaman əlamətləri – model – kalibrəlmə – xəbərdarlıq həddi – mühəndis yoxlaması (şəkil 2).

İkinci fəsildə ümumi mexanizmlərdən mühəndis parametrləri sisteminə keçid həyata keçirilmişdir. Quyudibi zonanın vəziyyətinin diaqnostikası keçiriciliyi, skin-faktoru, lay və quyu dibi təzyiqlərini, məhsuldarlıq əmsalını və ya qəbuletmə qabiliyyətini, təzyiq düşküsunü, faktiki debiti və rejim dəyişikliklərini nəzərə almalıdır. Bu

göstəricilərin heç biri ayrıca kolmatasiya barədə nəticə üçün kifayət etmir, lakin onların uyğun dinamikası davamlı süzülmə məhdudiyyətinin formalaşmasını aşkar etməyə imkan verir.³



Şəkil 2 – Fiziki parametrlər və mədən məlumatları əsasında kolmatasiyanın hibrid proqnozlaşdırma sxemi

İdarə olunan texnoloji amillərin rolu nəzərdən keçirilmişdir: qazma məhlulunun tərkibi və dispersliyi, süzgəc qabığının keyfiyyəti, mayenin kollektor mineralları ilə uyğunluğu, bərk fazanın qatılığı, təmas müddəti, quyu lüləsinin təmizlənməsi və məhsuldar layın açılması rejimi. Süzülmənin azalması, nazik, azkeçirici və çıxarıla bilən qabığın yaranması hissəciklərin daxilolma dəriniyini azaldır. Eyni zamanda həddindən artıq özlülük, hissəcik aqreqasiyası və ya sistemin qeyri-sabitliyi şlam daşınmasını pisləşdirir və invaziya riskini artırır [1, 2, 5–7].

Nanohissəciklər qabığın strukturunun və fazalararası qarşılıqlı təsirin tənzimlənməsi vasitəsi kimi ayrıca nəzərdən keçirilmişdir. Onların tətbiqi yalnız nanofazanın mövcudluğu faktına görə deyil,

³ Bourdet D. Well Test Analysis: The Use of Advanced Interpretation Models. Amsterdam: Elsevier, 2002. 438 p.

meyarlar toplusu — süzülmənin azalması, dispersiyanın dayanıqlığı, süxurla uyğunluq, reoloji xassələrin qorunması və iri aqreqatların yaranmaması üzrə qiymətləndirilməlidir. Bu yanaşma kolmatasiya əleyhinə effektin yalnız laboratoriya deyil, texnoloji baxımdan qiymətləndirilməsinin vacibliyini vurğulayır.

Aralıq mərhələ kimi interpretasiya məlumatları və süni neyron şəbəkə modelləri əsasında layın inteqral parametrlərinin bərpası imkanı göstərilmişdir. Altı quyu üzrə keçiricilik, skin-faktor və ilkin lay təzyiqi qiymətləri müqayisə edilmişdir. Ən kiçik nisbi xəta təzyiq, daha yüksək xətalər isə keçiricilik və skin-faktor üçün alınmışdır. Nəticələr modellərin köməkçi qiymətləndirmə vasitəsi kimi istifadə oluna biləcəyini təsdiqləyir, lakin ilkin məlumatlara nəzarəti və hidrodinamik interpretasiya ilə müqayisəni aradan qaldırmır [3, 8].

Diaqnostik sistem birbaşa fiziki məna daşıyan parametrlər ətrafında qurulmuşdur. Keçiricilik məsələli mühitin keçiriciliyini; məhsuldarlıq əmsalı və qəbuletmə qabiliyyəti sərf ilə təzyiq düşküsu arasındakı faktiki əlaqəni; skin-faktor isə quyuətrafı zonadakı əlavə müqaviməti xarakterizə edir. Lay və quyu dibi təzyiqləri layın ümumi tükənməsini lokal axın pisləşməsindən ayırmağa imkan verir. Müntəzəm hidrodinamik tədqiqatlar olmadıqda hesabi və bərpa edilmiş göstəricilərdən istifadə olunur, lakin onların xətası şərh zamanı nəzərə alınmalı və proqnostik modelin yüksək formal dəqiqliyi arxasında gizlədilməməlidir.

Quyunun hesabi potensialı müqayisə oluna bilən iş şəraiti üçün müəyyən edilir və faktiki məhsuldarlığın kənarlaşmasını qiymətləndirmək üçün baza rolunu oynayır. Bu göstərici dəyişməz pasport kəmiyyəti deyil: təzyiqdən, hasilat rejimindən, flüid xassələrindən və mövcud istismar tarixçəsindən asılıdır. Buna görə əlamətlər qurulmazdan əvvəl ölçü vahidləri və zaman nişanları yoxlanılır, boşluqlar emal edilir, dayanma, təmir və kəskin texnoloji dəyişikliklər müəyyən olunur. Müqayisə olunmayan rejimlərdə alınmış qiymətlər avtomatik olaraq lay zədələnməsinin təsdiqi kimi istifadə edilməməlidir.

Təhlil əsasında fiziki cəhətdən uyğun sxem formalaşdırılmışdır: mədən məlumatları keyfiyyət nəzarətindən keçir; sonra diaqnostik və zaman əlamətləri hesablanır; model risk ehtimalını formalaşdırır; iş

həddi ilə müqayisədən sonra nəticə mühəndisə yönəldilir. Sxemdə vurğulanır ki, maşın öyrətməsi kolmatasiya mexanizmini avtomatik müəyyən etmir. Yüksək risk rejimin, təsirlər tarixçəsinin, son tədqiqat nəticələrinin və əlavə diaqnostik tədbirlərin yoxlanması üçün əsasdır.

Əlamətlər yalnız proqnoz verilən anda məlum olan məlumatlardan formalaşdırılır. Parametrlərin əvvəlki qiymətləri, bir və bir neçə zaman addımı üzrə dəyişikliklər, sürüşən orta və standart kənarlaşmalar, faktiki və hesabi debit nisbətləri, həmçinin rejimin dayanıqlıq əlamətləri istifadə edilir. Bu sxem gələcək məlumatın təlim seçməsinə düşməsinə istisna edir. 3, 7 və 14 sutkalıq pəncərələr müvafiq olaraq qısamüddətli reaksiyanı, həftəlik dinamikanı və daha davamlı rejim dəyişməsinə əks etdirir; onların birgə tətbiqi tək sıçrayışı inkişaf edən tendensiyadan ayırmağa imkan verir.

Üçüncü fəsildə kolmatasiya faktiki məhsuldarlığın hesabi potensiala nisbətən davamlı pisləşməsi ilə özünü göstərən gizli istismar vəziyyəti kimi nəzərdən keçirilir. Kəmiyyət təhlili üçün G12 quyusunun mədən məlumatları birləşdirilmişdir: neftin faktiki və nəzəri debitləri, su və qaz debitləri, sululuq, qaz amili, quyu ağzı təzyiqi, ştuserin vəziyyəti, qazlift sərfi və son quyu tədqiqatlarının nəticələri. Zaman nişanları sinxronlaşdırılmış, ölçü vahidləri eyniləşdirilmiş, boşluqlar emal edilmiş, dayanma halları işarələnmiş və fiziki cəhətdən mümkün olmayan qiymətlər yoxlanılmışdır.⁴

G12 quyusu üzrə məlumatların seçilməsi onun üzrə kifayət qədər davamlı müşahidə sırasının və rejim göstəricilərinin mövcudluğu ilə bağlıdır. Bu obyekt əsasında indeksin hesablanması, risk hadisələrinin işarələnməsi və əlamətlər fəzasının formalaşdırılması ardıcılığı yoxlanılmışdır. Təhlildə əsas diqqət yalnız indeksin səviyyəsinə deyil, onun davamlılığına, bərpa sürətinə və digər rejim parametrləri ilə birgə dəyişməsinə yönəldilmişdir. Bu, qısamüddətli texnoloji dəyişiklikləri daha uzunmüddətli filtrasiya məhdudiyyətindən ayırmağa imkan verir.

Əsas diaqnostik göstərici kimi kolmatasiya indeksi qəbul edilmişdir:

⁴ Tariq Z., Abdulraheem A., Mahmoud M. et al. Data-driven analytics and machine learning applications in petroleum engineering. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2021. Vol. 11. P. 4339–4374.

$$IC(t) = Q_{fakt}(t) / Q_{nəzəri}(t),$$

burada $Q_{fakt}(t)$ — neftin faktiki debiti, $Q_{nəzəri}(t)$ — həmin tarix üçün quyunun hesabi potensialıdır. Vahidə yaxın qiymətlər faktiki işin hesabi səviyyəyə uyğunluğunu göstərir. İndeksin azalması fərqi artırmasına işarə edir, lakin özü-özlüyündə kolmatasiya faktını sübut etmir. Dinamikanın təhlili üçün əlavə olaraq nisbi dəyişmə tətbiq edilir:

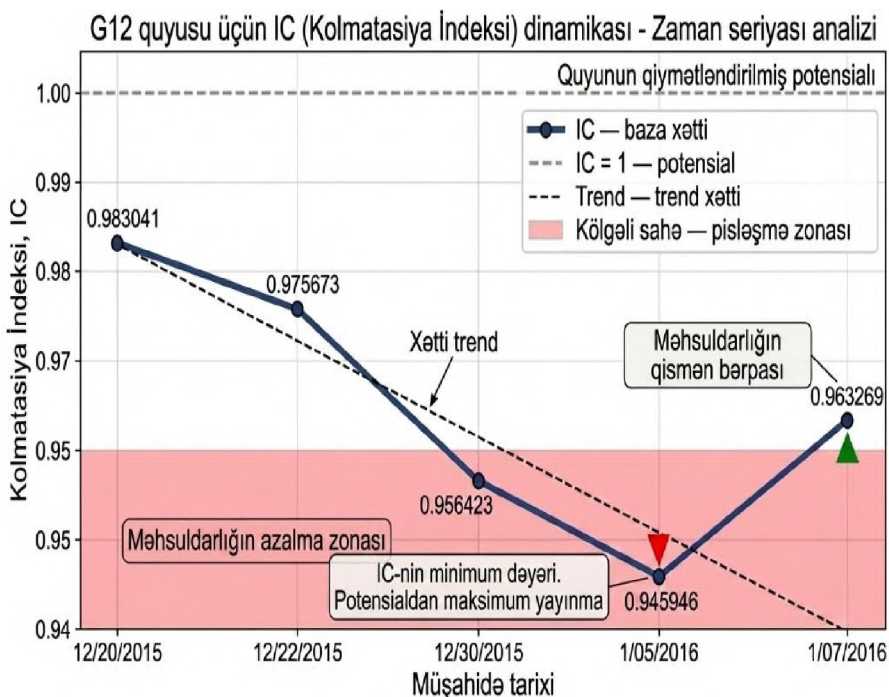
$$\Delta IC(t) = [IC(t) - IC(t-1)] / IC(t-1) \times 100\%.$$

Müşahidələrin ilk beş tarixində indeks 0,983-dən 0,946-ya qədər dəyişmiş, sonra qismən 0,963-ə qədər bərpa olunmuşdur. Nümunə göstəricisinin rejim dəyişməsinə həssaslığını və eyni zamanda uzun zaman sırasının və əlavə parametrlərin təhlilinə ehtiyacı göstərir (cədvəl 1, qrafik 1).

Cədvəl 1 – Kolmatasiya indeksinin hesablanmasına nümunə

Tarix	Qfakt, barel/sut	Qnəzəri, barel/sut	IC
20.12.2015	8521	8668	0,983
22.12.2015	9425	9660	0,976
30.12.2015	6738	7045	0,956
05.01.2016	6790	7178	0,946
07.01.2016	7238	7514	0,963

Tam sıra 2015–2017-ci illəri əhatə edir. Müşahidələrin əvvəlində faktiki debit təxminən 8000–9500 stb/sut təşkil etmiş, sonra qeyri-bərabər dəyişmiş və sonrakı dövrlərdə azalmışdır. Kolmatasiya indeksi əksər nöqtələrdə vahidə yaxın olmuş, lakin ayrı-ayrı dərin və uzunmüddətli enmələr də müşahidə edilmişdir. Ekstremal qiymətlərin bir hissəsi dayanma halları və ya nəzəri debitin hesablanma xüsusiyyətləri ilə bağlı ola bildiyindən avtomatik olaraq fiziki kolmatasiya kimi şərh edilməmişdir (qrafik 2).



Qrafik 1 – G12 quyusunun ilk tarixləri üzrə kolmatasiya indeksinin hesablanması və dinamikasının təsviri

Məlumat massivində 308 uyğunlaşdırılmış müşahidə əldə edilmişdir. İndeksin orta qiyməti 0,932, medianı 0,938 olmuşdur. Qəbul edilmiş diaqnostik səviyyədən aşağı müşahidələrin payı təxminən 17,3%, lokal enmələrin sayı 78 olmuşdur. Davamlı azalma intervalları 3–13 sutka davam etmişdir. Ən kəskin epizod 2017-ci ilin avqustunda müşahidə edilmiş və indeksin minimum qiyməti 0,428-ə çatmışdır.

Ranq korrelyasiya təhlili indeksin qaz debiti və quyu ağzı təzyiqi ilə müsbət, sululuq, su debiti, ştuserin açılması və qazlift sərfi ilə mənfi əlaqəsini göstərmişdir. Korrelyasiyalar səbəbiyyət sübutu kimi istifadə edilməmiş, lakin əlamətlərin formalaşdırılması istiqamətlərini və faktiki məhsuldarlığın hesabi səviyyədən kənarlaşmasını müşayiət edən parametrləri müəyyən etməyə kömək etmişdir (cədvəl 2).



Qrafik 2 – Müşahidə dövründə G12 quyusu üzrə kolmatasiya indeksinin dinamikası

Təhlildə mədən və hesabi məlumatların tarixlər üzrə birləşdirilməsindən sonra alınmış 308 uyğunlaşdırılmış müşahidədən istifadə edilmişdir. İndeksin ümumi səviyyəsi ilə yanaşı, lokal enmələr, diaqnostik səviyyədən aşağı qalma müddəti və sonrakı bərpa sürəti nəzərdən keçirilmişdir. Dayanma və ya ştuserin kəskin dəyişməsi ilə üst-üstə düşən qısamüddətli azalma nisbətən sabit rejimdə tədricən pisləşmədən fərqli şərh edilmişdir. Bu yanaşma indeksin hər azalmasının vahid fiziki səbəbə malik olduğunu iddia etmədən risk hadisələrini formalaşdırmağa imkan vermişdir.

Korrelyasiya təhlili yalnız ilkin mərhələ kimi istifadə edilmişdir. İndeksin qaz debiti və quyu ağzı təzyiqi ilə müsbət, sululuq, su debiti və ştuserin açılması ilə mənfi əlaqəsi axın rejiminin dəyişməsi ilə uyğunluq göstərir, lakin səbəbiyyəti sübut etmir. Buna görə əlamətlər yalnız cüt korrelyasiyanın qiymətinə görə seçilməmişdir. Onların fiziki mənası, proqnoz anına qədər mövcudluğu, zaman üzrə dayanıqlığı və gələcək işarə ilə birbaşa əlaqəsinin olmaması nəzərə alınmışdır.

Cədvəl 2 – Rejim parametrlərinin kolmatasiya indeksi ilə əlaqəsi

Parametr	IC ilə rəng korrelyasiya əmsali
Qaz debiti	0,419
Quyu ağzı təzyiqi	0,391
Qaz amili	0,245
Qazlift sərfi	–0,210
Ştuserin açılması	–0,289
Su debiti	–0,366
Sululuq	–0,419

Nəticədə ilkin kanalları, kolmatasiya indeksini, onun əvvəlki qiymətlərini, dəyişmə templərini, 3, 7 və 14 sutkalıq pəncərələr üzrə sürüşən orta və standart kənarlaşmaları, məlumat keyfiyyəti əlamətlərini və hadisələrin binar indikatorlarını ehtiva edən integrasiya olunmuş məlumat dəsti formalaşdırılmışdır. Bu struktur mühəndis təhlilindən səbəb baxımından düzgün proqnozlaşdırma məsələsinə keçidi təmin edir.

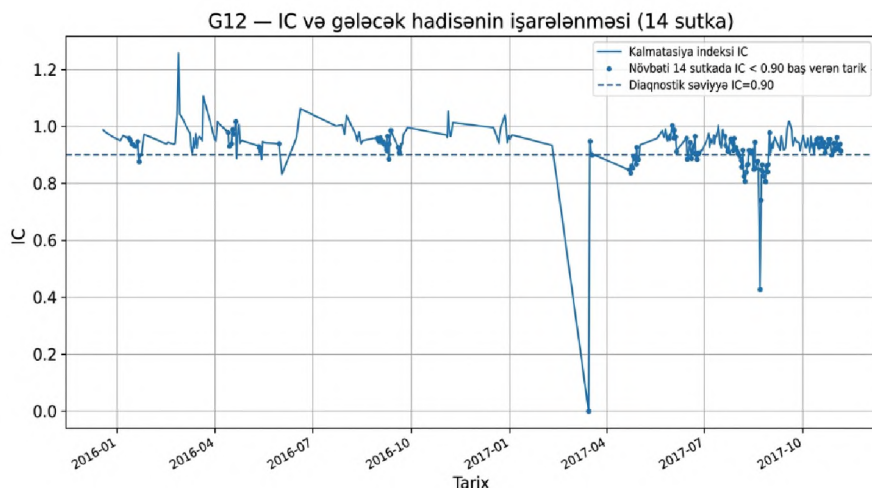
Dördüncü fəsildə hədəf dəyişən səbəb baxımından düzgün formalaşdırılmışdır. Hər t tarixi üçün növbəti 14 sutkada, yəni $(t; t+14]$ intervalında kolmatasiya indeksi ən azı bir dəfə 0,90-dan aşağı düşdükdə müsbət işarə verilir. Cari tarix hədəf pəncərəsinə daxil edilmir və gələcək dövrün göstəriciləri əlamət kimi istifadə olunmur.⁵

Yekun proqnoz üföqü 14 sutka olaraq sabitləşdirilmişdir. IC-nin nisbi azalmasına əsaslanan əlavə işarə yalnız köməkçi yoxlama üçün istifadə edilmiş və yekun istismar konveyerinə daxil edilməmişdir.

⁵ Bergmeir C., Benítez J.M. On the use of cross-validation for time series predictor evaluation. Information Sciences. 2012. Vol. 191. P. 192–213. DOI: 10.1016/j.ins.2011.12.028.

Belə ayrılma əsas erkən xəbərdarlıq məsələsinin alternativ işarələmə variantları ilə qarışdırılmasının qarşısını alır (qrafik 3).

Əsas keyfiyyət meyarı kimi “dəqiqlik–tamlıq” əyrisinin altında sahə (PR-AUC), əlavə meyar kimi ROC əyrisinin altında sahə (ROC-AUC) qəbul edilmişdir. Ehtimal proqnozu üçün Brayer göstəricisi və gözlənilən kalibrəmə xətası (ECE), iş nöqtəsi üçün isə dəqiqlik, tamlıq və yanlış-müsbət siqnalların payı (FPR) istifadə olunmuşdur.



Qrafik 3 – G12 quyusu üzrə 14 sutkalıq üfüqdə IC dinamikası və gələcək hadisənin işarələnməsi

Yekun əlamətlər fəzasına 19 dəyişən daxildir: müşahidə günü, iş saati, ştuser, quyu ağzı təzyiqi, neftin faktiki debiti, qaz və su debitləri, NGOR, sululuq, GLR, neftin hesabi debiti, hesabi qaz amili və sululuq, cari IC, IC dəyişməsi, əvvəlki IC, təxmini məhsuldarlıq indeksi, GLR-in nisbi dəyişməsi və əvvəlki müşahidədən keçən günlərin sayı. Gələcək işarələr və xidməti sahələr çıxarılmışdır.

Sərt işarələmədən sonra G12 məlumatları xronoloji bölünmüşdür: təlim — 20.12.2015–01.12.2016, validasiya — 01.01.2017–03.06.2017, test — 04.07.2017–06.11.2017. Təlimlə validasiya, həmçinin validasiya ilə test arasında 30 sutkalıq qoruyucu

intervallar saxlanılmışdır. Yekun hissələr müvafiq olaraq 108, 35 və 126 müşahidədən ibarətdir (cədvəl 3).

Cədvəl 3 – Qoruyucu intervallarla G12 zaman sırasının xronoloji bölünməsi

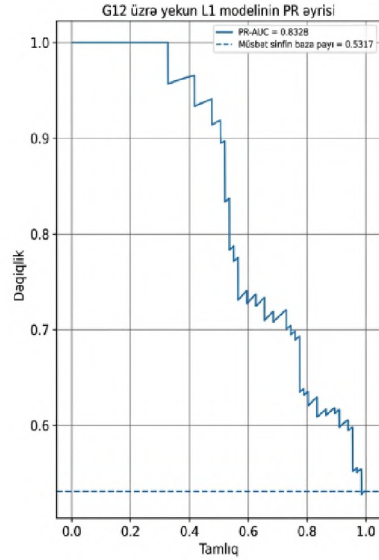
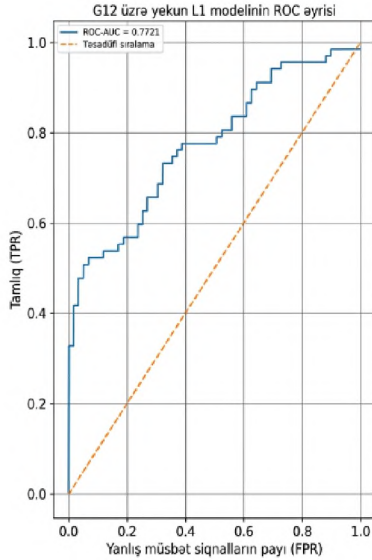
Seçmə	Başlanğıc	Son
Təlim	20.12.2015	01.12.2016
Validasiya	01.01.2017	03.06.2017
Test	04.07.2017	06.11.2017

Validasiya seçməsində L1 və L2 nizamlanmış logistik modellər, xətti dayaq vektorları üsulu və təsadüfi meşə müqayisə edilmişdir. $C = 0,1$ olan L1-nizamlanmış logistik reqressiya ən yüksək PR-AUC göstərmişdir: PR-AUC = 0,8355 və ROC-AUC = 0,7961. 157 əlamətli tam dəstdə təsadüfi meşə PR-AUC = 0,4249 nəticə vermiş və mürəkkəbliyinə uyğun üstünlük təmin etməmişdir.

Yekun model test məlumatlarına baxılmadan əvvəl sabitləşdirilmişdir. G12 üzrə müstəqil test intervalında PR-AUC = 0,8328 və ROC-AUC = 0,7721 alınmış, PR-AUC-un baza səviyyəsi 0,5317 olmuşdur. Beləliklə, model sonrakı zaman dövründə sıralama qabiliyyətini saxlamış və müsbət sinfin payına əsaslanan sadə sıralamadan əhəmiyyətli dərəcədə üstün olmuşdur (qrafik 4).

Əlavə zaman yoxlaması üçün genişlənən təlim pəncərəsi və qoruyucu interval ilə rolling-origin sxemi istifadə edilmişdir. İmputasiya, miqyaslandırma, modelin öyrədilməsi və kalibrləmə yalnız müvafiq daha erkən məlumatlar əsasında qiymətləndirilmişdir. Bu sxem müşahidələrin real daxilolmasını təqlid edir və gələcəkdən məlumat sızmasının qarşısını alır.

Ehtimalların kalibrlənməsi model seçildikdən sonra aparılmışdır. İlk skorlar, Platt üsulu və izotonik reqressiya müqayisə edilmişdir. Yekun konveyer üçün Platt kalibrləməsi seçilmişdir: test seçməsində Brayer göstəricisi 0,2248, ECE isə 0,1350 olmuşdur. İzotonik kalibrləmə kiçik validasiya seçməsində ECE = 0 vermiş, lakin test PR-AUC, ROC-AUC və ECE-ni pisləşdirmişdir ki, bu da həddindən artıq uyğunlaşmanı göstərir.

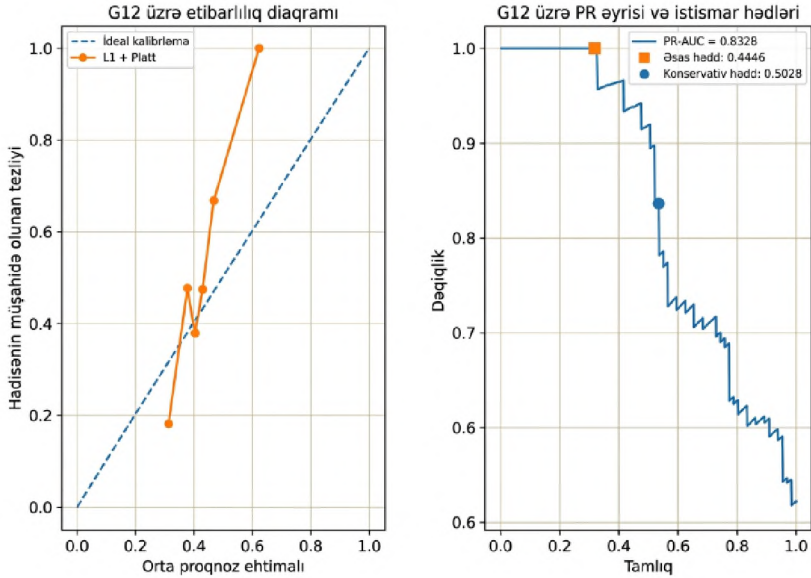


Qrafik 4 – G12 test seçməində yekun L1-nizamlanmış modelin ROC və PR əyriləri

Əsas $\tau^* = 0,4446$ istismar həddi cari IC hələ 0,90-dan aşağı düşməyən validasiyanın hadisəöncəsi hissəsində $FPR \leq 0,15$ şərti ilə tamlığın maksimumlaşdırılması üzrə seçilmişdir. Tam validasiya seçməində seçilmiş $\tau = 0,5028$ konservativ nəzarət nöqtəsi də saxlanılmışdır. Hədd $p(t)$ proqnoz ehtimalına tətbiq olunur, $IC < 0,90$ isə faktiki hadisəni müəyyən edir.

G12 üzrə tam test seçməində $\tau^* = 0,4446$ həddi 67 müsbət müşahidədən 36-nı aşkar etmiş, 7 yanlış xəbərdarlıq yaratmış və 31 müşahidəni buraxmışdır; dəqiqlik 0,8372, tamlıq 0,5373, FPR 0,1186 olmuşdur. Hadisəöncəsi hissədə 44 müsbət müşahidədən 14-ü 6 yanlış xəbərdarlıqla aşkar edilmiş, $FPR = 0,1034$ olmuşdur. Konservativ hədd yanlış xəbərdarlıqları aradan qaldırmış, lakin tamlığı 0,3134-ə endirmişdir (qrafik 5).

Ablyasiya təhlili göstərmişdir ki, L1 nizamlanması 19 giriş dəyişənindən dörd sıfırdan fərqli əmsal saxlamışdır: cari IC, su debiti, GLR-in nisbi dəyişməsi və əvvəlki IC. Cari IC çıxarıldıqda PR-AUC 0,8054-ə, cari və əvvəlki IC birlikdə çıxarıldıqda isə PR-AUC 0,5924-ə və ROC-AUC 0,4908-ə düşür. Deməli, əsas proqnostik töhfə IC ailəsi ilə bağlıdır, rejim əlamətlərinin əlavə informasiyası isə mövcud seçmədə məhduddur.

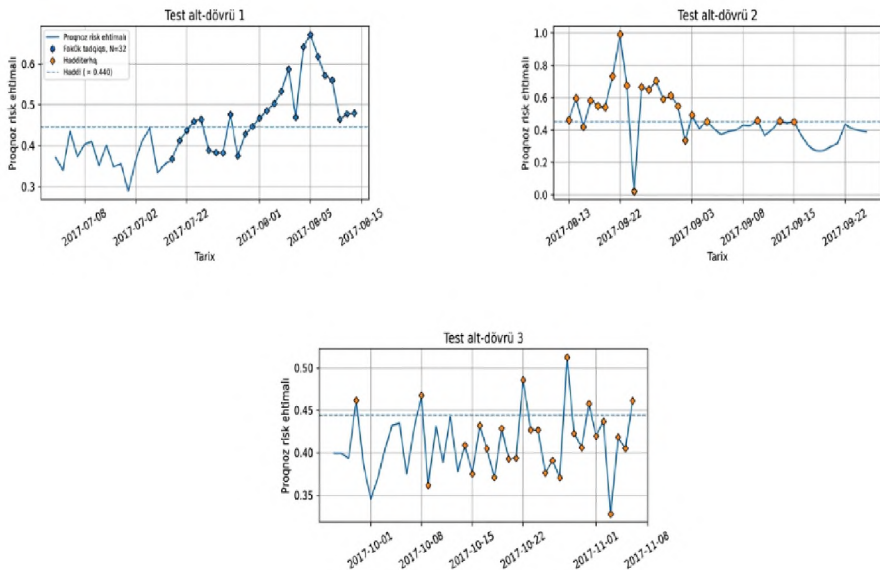


Qrafik 5 – G12 üzrə yekun modelin ehtimal kalibrəlməsi və istismar hədləri

Keyfiyyət zaman üzrə qeyri-bircins olmuşdur. Ardıcıl üç test alt-dövründə təhlil 0,6923; 0,8235 və 0,1667, FPR isə müvafiq olaraq 0; 0,2000 və 0,1111 olmuşdur. 14 sutkalıq bloklu butstrep PR-AUC üçün 0,5565–0,9598 geniş 95%-lik interval vermişdir; buna görə tək nöqtə qiyməti ehtiyatla şərh edilməlidir (qrafik 6).

Əmsalın işarəsi robust miqyaslandırmadan sonra təsirin istiqamətini göstərir. Cari IC-nin mənfi əmsalı indeks azaldıqda proqnoz riskinin yüksəldiyini bildirir. Su debiti, GLR dəyişməsi və əvvəlki IC üzrə modulca daha kiçik əmsallar əsas signalı tamamlayır.

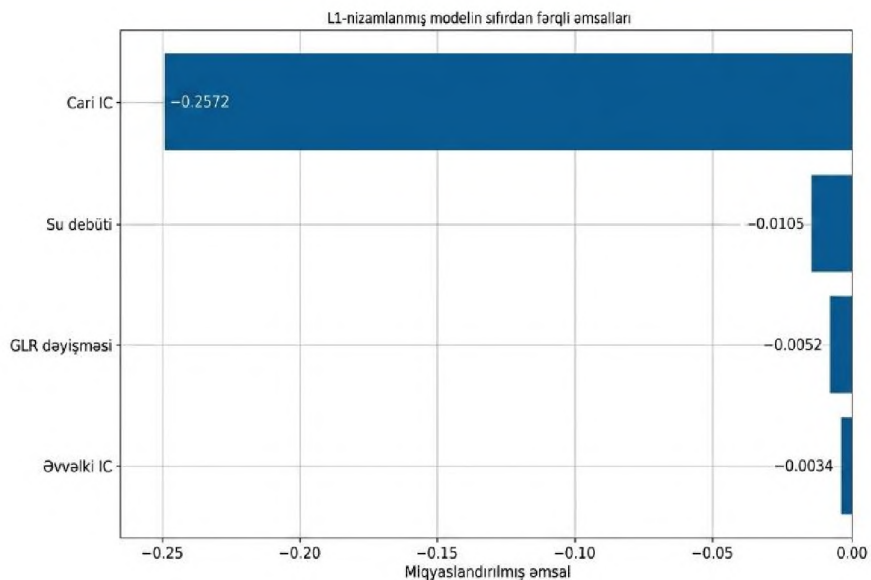
Sıfırdan fərqli əmsal fiziki səbəbiyyətin sübutu deyil, əlamətin model qərarına töhfəsini xarakterizə edir (qrafik 7).



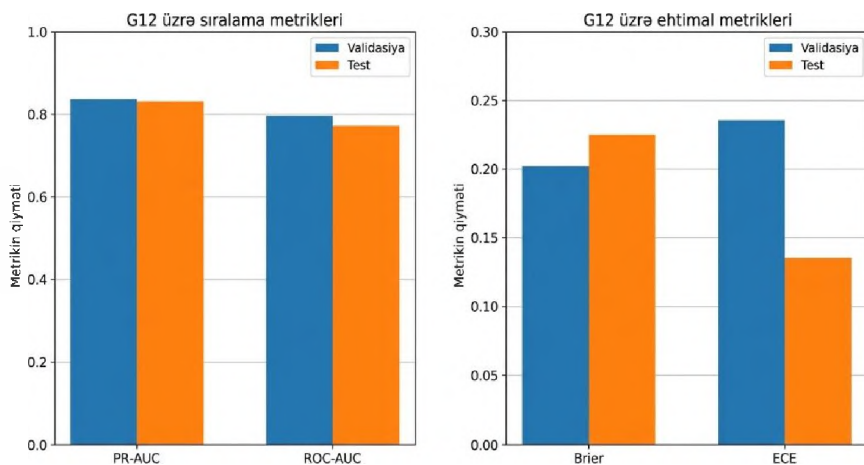
Qrafik 6 – G12 üzrə ardıcıl test alt-dövrələrində risk ehtimalı və xəbərdarlıqlar

Lokal şərh 23.07.2017 tarixində düzgün erkən xəbərdarlıq və 16.10.2017 tarixində buraxılmış müsbət müşahidə üçün aparılmışdır. Birinci halda 0,4604 ehtimal hadisədən 11 sutka əvvəl həddi keçmiş, ikinci halda 0,4322 ehtimal həddə çatmamış, lakin hadisə 12 sutka sonra baş vermişdir. Müqayisə istismar həddinin mühəndis konteksti ilə birlikdə şərh edilməli olduğunu göstərir.

Validasiya və test müqayisəsi sıralama metriklərinin az dəyişdiyini göstərmişdir: PR-AUC 0,8355-dən 0,8328-ə, ROC-AUC 0,7961-dən 0,7721-ə enmişdir. Brayer göstəricisi 0,2024-dən 0,2248-ə yüksəlmiş, ECE isə 0,2358-dən 0,1350-yə azalmışdır. Beləliklə, sıralama saxlanılmış, lakin ehtimal keyfiyyəti ayrıca izlənilməli və yalnız ROC və ya PR əyrisindən çıxarılmamalıdır (qrafik 8).



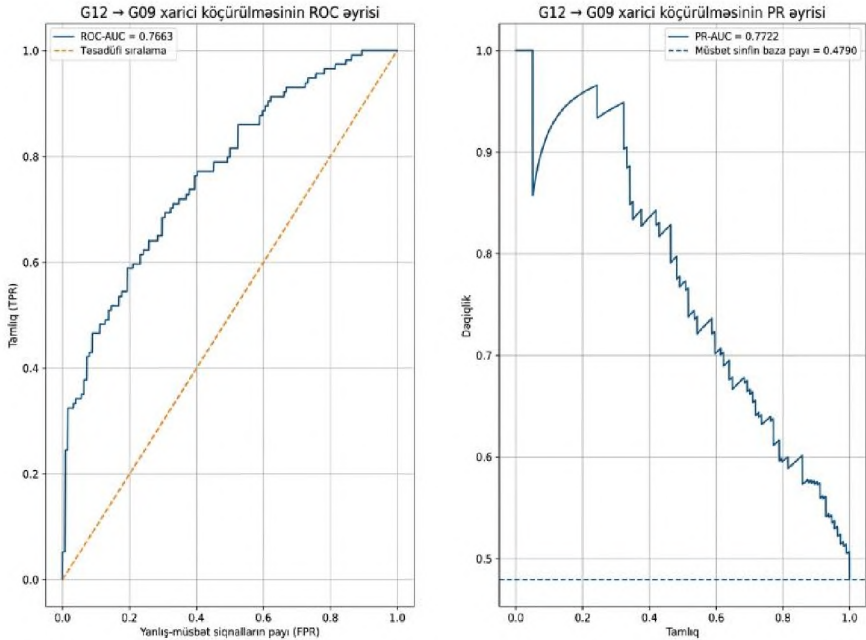
Qrafik 7 – Yekun L1-nizamlanmış modelin sıfırdan fərqli əmsalları



Qrafik 8 – G12 validasiya və test seçmələrində sıralama və ehtimal metriklərinin müqayisəsi

Xarici yoxlama üçün G12-də sabitləşdirilmiş konveyer G09-a təkrar öyrətmədən, 19 əlaməti dəyişmədən və yeni hədd seçmədən tətbiq edilmişdir. Xarici seçmə 238 müşahidədən, o cümlədən 114 müsbət müşahidədən ibarətdir. Tam seçmədə PR-AUC = 0,7722, ROC-AUC = 0,7663, Brayer göstəricisi = 0,2167 və ECE = 0,1128 alınmışdır (qrafik 9).

Əsas $\tau^* = 0,4446$ həddi G09-un tam seçməsinə köçürüldükdə 59 hadisə aşkar edilmiş, 21 yanlış xəbərdarlıq yaranmış və 55 hadisə buraxılmışdır; dəqiqlik 0,7375, təmliq 0,5175, FPR 0,1694 olmuşdur. Cari $IC \geq 0,90$ olan hadisəöncəsi hissədə təmliq 0,2763, FPR isə 0,1271 olmuşdur.



Qrafik 9 – Yekun modelin G12 → G09 xarici köçürülməsinin ROC və PR əyriləri

Nəticələr ümumi sıralama qabiliyyətinin başqa quyuda saxlandığını, lakin iş nöqtəsinin tam xarici seçmədə FPR məhdudiyyətini tam qorunmadığını göstərir. Buna görə yeni obyektdə köçürmə zamanı məlumat tərkibi, əlamət paylanmaları, kalibrəlmə və

yanlış xəbərdarlıqların dəyəri yoxlanılmalı, zərurət olduqda lokal təkrar kalibrəlmə və ya həddin yenidən seçilməsi aparılmalıdır.

G09 məlumatları yalnız xarici qiymətləndirmə üçün istifadə edilmiş və G12 modelinin hazırlanmasında iştirak etməmişdir. Bu, yoxlamanın müstəqilliyini saxlayır və sabit skor funksiyasının köçürülməsini ümumi metodologiyanın köçürülməsindən ayırmağa imkan verir. Dəyişməz modelin bütün quyular üçün universal olması iddia edilmir.

Gündəlik istismar konveyeri hazırlanmışdır: yeni məlumatların yüklənməsi və yoxlanması; 19 əlamətin sabit ardıcılıqla hesablanması; təlim parametrləri ilə median imputasiya və robust miqyaslandırma; L1 model skorunun alınması; Platt kalibrəlməsi; ehtimalın $\tau^* = 0,4446$ həddi ilə müqayisəsi; xəbərdarlığın jurnala yazılması (cədvəl 4).

Cədvəl 4 – Proqnozun gündəlik tətbiqi qaydası

Mərhələ	Əsas məzmun	Nəticə
Məlumatlara nəzarət	Tamliq, ölçü vahidləri, tarixlər, boşluqlar və rejim dəyişmələri	Yoxlanılmış zaman sırası
Əlamətlərin hesablanması	19 səbəb baxımından yol verilən sabit əlamət dəsti	Əlamətlər vektoru
Proqnoz	L1 logistik model və Platt kalibrəlməsi	14 sutkalıq risk ehtimalı
Hədd və xəbərdarlıq	$\tau^* = 0,4446$ ilə müqayisə və jurnala yazılma	Mühəndis yoxlaması üçün signal
Mühəndis qərarı	Rejim və diaqnostik məlumatların yoxlanması	Müşahidə, tədqiqat və ya tədbir

Xəbərdarlıq yekun diaqnoz deyil. Mühəndis cari və əvvəlki IC-ni, debitləri, təzyiqi, ştuseri, sululuğu, qaz nisbətlərini, boşluqları və son əməliyyatları yoxlayır, sonra müşahidənin davamı, əlavə tədqiqat, rejimin korreksiyası və ya bərpa tədbiri barədə qərar qəbul edir.

Tək və təkrarlanan siqnalları azaltmaq üçün istismar məntiqinə ardıcıl m hesablamadan n-də təsdiq, xəbərdarlığın qoşulması və söndürülməsi arasında histerezis və təkrar bildiriş üçün bloklama müddəti daxil edilə bilər. Bu qaydalar ayrıca validasiya dövründə sazlanır və hədəf hadisənin tərifini dəyişmir.

Monitoring PR-AUC, ROC-AUC, Brayer göstəricisi, ECE, hadisəöncəsi tamlıq və FPR, xəbərdarlıqların payı və giriş əlamətlərinin paylanması əhatə edir. Kalibrləmə pisləşdikdə təkrar kalibrləmə, sıralama qabiliyyəti itirildikdə isə üfüq, hədəf tərfi və səbəb strukturu saxlanılmaqla yeni zaman yoxlaması və təkrar öyrətmə aparılır.

ƏSAS NƏTİCƏLƏR VƏ TÖVSIYƏLƏR

1. İşdə göstərilmişdir ki, quyudibi zonanın kolmatasiya olunması lay ilə quyu arasında filtrasiya əlaqəsini zəiflədə və istismar səmərəliliyini azalda bilən amillərdən biridir. Buna görə də quyunun vəziyyətinə vaxtında nəzarət etmək üçün yalnız sonrakı diaqnostika deyil, mümkün riskin erkən qiymətləndirilməsi də mühüm əhəmiyyət daşıyır [1, 6].

2. Quyunun işində baş verən dəyişikliklərin kəmiyyətə qiymətləndirilməsi üçün kolmatasiya indeksi $IC = Q_{fakt}/Q_{nəzəri}$ istifadə edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, bu göstərici faktiki məhsuldarlığın hesablanmış potensialdan kənarlaşmasını xarakterizə edən mühəndis diaqnostik indikatoru kimi tətbiq oluna bilər, lakin kolmatasiyanın yeganə və birbaşa sübutu kimi qəbul edilməməlidir [6, 10].

3. Riskin erkən proqnozlaşdırılması üçün hədəf dəyişəni formalaşdırılmışdır: risk hadisəsi kimi növbəti 14 gün ərzində IC göstəricisinin 0,90-dan aşağı düşməsi qəbul edilmişdir. Bu proqnoz üfuku quyunun vəziyyətində mümkün pisləşməyə əvvəlcədən diqqət yetirməyə imkan verən praktiki baxımdan əlverişli interval kimi seçilmişdir [10].

4. Hasilat zaman sıraları əsasında neft, qaz və su debitlərini, sulanmanı, qaz nisbətlərini, hesablanmış potensialı, IC göstəricisinin cari və əvvəlki qiymətlərini, həmçinin quyunun iş rejiminin dəyişməsinə xarakterizə edən göstəriciləri əhatə edən əlamətlər toplusu formalaşdırılmışdır. Əlamətlərin qurulması zamanı modelə gələcək dövrə aid məlumatların daxil edilməməsi nəzərə alınmışdır [3, 8, 10].

5. Modellərin müqayisəsinin nəticələrinə əsasən praktiki tətbiq üçün L1-regulyarlaşdırmalı və ehtimalların kalibrlənməsi ilə logistik reqressiya modeli seçilmişdir. G12 quyusunun test intervalında model yüksək riskli dövrləri ayırmaq və müşahidələri əlverişsizlik dərəcəsinə görə sıralamaq qabiliyyətini göstərmişdir [8, 10].

6. Müəyyən edilmişdir ki, proqnoza ən böyük təsiri kolmatasiya indeksinin dinamikası göstərir, lakin quyunun rejim parametrləri də nəticənin mühəndis baxımından şərh üçün əhəmiyyətlidir. Bu, proqnozun tək bir göstərici əsasında deyil, mədən əlamətlərinin məcmusu əsasında qurulmalı olduğunu göstərir [6, 10].

7. G09 quyusunda aparılmış yoxlama göstərmişdir ki, təklif olunan yanaşma digər quyuda da tətbiq oluna bilər. Bununla belə, belə keçid zamanı məlumatların keyfiyyəti, risk həddi və modelin kalibrlənməsi əlavə olaraq yoxlanılmalıdır. Buna görə də modelin uyğunlaşdırılmadan universal tətbiqi tövsiyə edilmir [10].

8. Monitoring sistemində proqnozun praktiki istifadəsi üçün qayda işlənib hazırlanmışdır: məlumatların müntəzəm yenilənməsi, əlamətlərin hesablanması, risk ehtimalının alınması, xəbərdarlıqların qeydə alınması və alınmış signalın mütləq mühəndis yoxlamasından keçirilməsi [8, 10].

9. Təklif olunan metodologiyanın mühəndis qərarlarının dəstəklənməsi aləti kimi istifadə edilməsi tövsiyə olunur: quyuların risk səviyyəsinə görə sıralanması, əlavə diaqnostika tələb edən obyektlərin seçilməsi, istismar rejiminin təhlili və profilaktik tədbirlərin planlaşdırılması üçün [3, 8, 10].

DİSSERTASIYANIN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ AŞAĞIDAKI ƏSƏRLƏRDƏ DƏRC OLUNMUŞDUR

1. Абдулмуталибов, Т.Э. Исследование механизмов повреждения пласта в песчанике // Материалы Республиканской научной конференции молодых исследователей и докторантов, посвящённой 100-летию со дня рождения Гейдара Алиева. Баку, 4–5 мая 2023. С. 1–5.

2. Абдулмуталибов, Т.Э., Шмончева, Е.Е. Уменьшение повреждения пласта за счёт проектирования и выбора буровых растворов // Нефтегазовое дело, техносферная безопасность, рациональное природопользование: современные реалии: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Махачкала: ДГТУ, 16–17 мая 2023.

3. Абдулмуталибов, Т.Э., Шмончева, Е.Е., Джаббарова, Г.В. Возможность использования больших данных и машинного обучения для повышения эффективности бурения // Гейдар Алиев и нефтяная стратегия Азербайджана: достижения нефтегазовой геологии и геотехнологий. Баку, 23–26 мая 2023. С. 1002–1007.

4. Абдулмуталибов, Т.Э., Джаббарова, Г.В. Нанотехнология в буровых растворах // Булатовские чтения: материалы VII Международной научно-практической конференции. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2023. Т. 1. С. 328–329.

5. Абдулмуталибов, Т.Э., Шмончева, Е.Е. Экспериментальное исследование эрозии образцов соленосных пород // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2023: материалы международной научно-технической конференции. Уфа: УГНТУ, 2023. С. 542–545.

6. Абдулмуталибов, Т.Э., Джаббарова, Г.В. Оценка начального давления, проницаемости и скин-фактора пласта с использованием методов машинного обучения // Технологии разработки месторождений и моделирование процессов в нефтегазодобыче. Уфа: УГНТУ, 2023. С. 224–225.

7. Abdulmutalibov, T.E., Shmoncheva, Y.Y., Jabbarova, G.V. Drilling fluids in complicated conditions: a review. Nafta-Gaz. 2023. No. 10. P. 660–669. DOI: 10.18668/NG.2023.10.03.

8. Abdulmutalibov, T.E., Jabbarova, G.V., Shmoncheva, Y.Y. Advancements in applications of machine learning for formation damage predictions. SPE Caspian Technical Conference and Exhibition. Baku, 21–23 November 2023. DOI: 10.2118/217610-MS.

9. Абдулмуталибов, Т.Э., Салаев, М.Т., Шмончева, Е.Е., Джаббаров, Г.В., Кузнецов, В.А. Превентор универсальный. Евразийский патент № 045267B1. 2023.

10. Abdulmutalibov, T.E., Malikov, H.Kh., Jabbarova, G.V., Tashmenov, R.R. Forecasting the risk of formation damage (colmatation) with a 14-day horizon using calibrated probabilistic models. Journal of SRI “Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry”. 2025. Issue 2. P. 106–120.

11. Abdulmutalibov, T.E., Jabbarova, G.V., Shmoncheva, Y.Y. Universal BOP with built-in grinding tool. Nafta-Gaz. 2025. No. 7. P. 474–481. DOI: 10.18668/NG.2025.07.06.

İddiəçının dərc olunmuş əsərlərində və dissertasiya işində şəxsi payı:

[1] sayılı iş iddiaçı tərəfindən müstəqil olaraq, həmmüəllifsiz yerinə yetirilmişdir.

[2, 3, 5, 7, 8, 9, 11] sayılı işlərdə müəlliflərin iştirakı bərabərdir.

[4, 6, 10] sayılı işlərdə iddiaçının şəxsi töhfəsi məsələnin qoyuluşundan, tədqiqatların aparılmasında iştirakdan, alınmış nəticələrin ümumiləşdirilməsi və təhlilindən ibarətdir.



Dissertasiyanın müdafiəsi 29 sentyabr 2026-cı il tarixində saat 11:00-də Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən FD 2.03 sayılı Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ 1010. Bakı şəhəri, Azadlıq prospekti, 34

Dissertasiya ilə Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat "28" avqust 2026-cı il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 27.08.2026

Kağız formatı: A5

Həcmi: 37382

Tiraj: 30