

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

TƏBİİ QAZIN HASILI VƏ EMALI ZAMANI YARANAN FAZA ÇEVİRİLMƏLƏRİNİN RASİONAL İDARƏ EDİLMƏ SİSTEMLƏRİNİN TƏKMİLLƏŞDİRİLMƏSİ

İxtisas: 2525.01 - Neft və qaz yataqlarının
işlənməsi və istismarı

Elm sahəsi: Texnika elmləri

İddiaçı: **Kənan Fikrət oğlu Aliyev**

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 elmləri doktoru, dosent
Vüqar Məhərrəm oğlu Fətəliyev

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

Texnika elmləri doktoru, dosent
Mübariz Sevdimalı oğlu Xəlilov

Texnika elmləri doktoru, dosent
Eldar Mehdi oğlu Abbasov

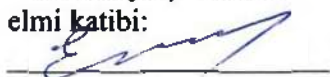
Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən FD 2.03 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının Texnika elmləri doktoru, professor
sədri:



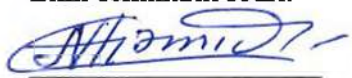
Elman Xeyrulla oğlu İskəndərov

Dissertasiya şurasının Texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
elmi katibi:



Yelena Yevgenyevna Şmonçeva

Elmi seminarın sədri: Texnika elmləri doktoru, dosent



Natiq Neyman oğlu Həmidov

İmzaları təsdiq edirəm:

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



İqbal Namiq oğlu Əliyev

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Qlobal enerji sistemində baş verən transformasiyalara və alternativ enerji mənbələrinin sürətli inkişafına baxmayaraq, dünyanın sənaye və məişət sektorlarında enerji istehlakı artmaqda davam edir. Bu baxımdan təbii qaza və ümumilikdə karbohidrogen resurslarına olan tələbat öz aktuallığını və strateji əhəmiyyətini qoruyub saxlayır. Mövcud karbohidrogen yataqlarında ehtiyatların tədricən azalması müşahidə olunsa da, enerji təhlükəsizliyinin təmin edilməsi məqsədilə bu sahəyə yönəldilən investisiyaların həcmi azalmır. Bununla yanaşı, yalnız ənənəvi yataqlar deyil, istismar texnologiyası baxımından daha mürəkkəb hesab olunan qeyri-ənənəvi karbohidrogen mənbələri də tədqiqat və praktiki maraq dairəsinə daxil edilməkdədir. Eyni zamanda, istismarda olan yataqlarda qalıq ehtiyatların daha səmərəli hasil edilməsi, hasilat proseslərinin rəasional idarə olunması və mövcud texnologiyaların təkmilləşdirilməsi müasir dövrdə neft-qaz sənayesinin prioritet istiqamətləri kimi ön plandadır.

Təbii qaz yataqları əsasən çoxkomponentli qarışıqlardan ibarət olduğundan, onların istismarı zamanı dəyişən termobarik şərait nəticəsində faza tarazlığının pozulması, maye fazanın ayrılması, axın strukturunun dəyişməsi və bəzən hidrat əmələgəlməsi kimi hadisələr müşahidə olunur. Axının təzyiq və temperaturunun mürəkkəb şəkildə dəyişməsi lay-quyu-yerüstü texnoloji avadanlıqlar sistemi boyunca axının sabitliyinə və hasilat göstəricilərinə mühüm təsir göstərir. Bu sahə neft-qaz mühəndisliyi üçün geniş tədqiq olunmuş istiqamətlərdən olsa da, hələ də müasirdir və həlli tam müəyyənləşməmiş məsələlər kimi geniş tədqiqatların əsas predmetlərinə daxildir.

Buna əsaslanaraq, dissertasiya işində təbii qazın hasilatı və ilkin emalı zamanı baş verən faza çevrilmələrinin hidrodinamik və termodinamik aspektləri, axın rejimlərinin formalaşması, onların hasilat göstəricilərinə təsiri və rəasional idarəetmə texnologiyalarının işlənilməsi müasir neft-qaz sənayesi üçün aktual elmi problemlər sırasına daxildir. Bu məsələlərin kompleks şəkildə öyrənilməsi qaz və qazkondensat yataqlarının səmərəli işlənməsi, istismar proseslərinin optimallaşdırılması və karbohidrogen veriminin artırılmasına mühüm

təhfi verə bilər.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Dissertasiya işində qaz hasilatı sistemində faza çevrilmələri nəticəsində yaranan proseslərin idarə olunması üsulları tədqiq edilir. Bu baxımdan, işin obyektı və predmetini aşağıdakı kimi ifadə etmək olar.

Tədqiqatın obyektı qaz hasilatı zamanı lay məhsulunda baş verən faza çevrilmələrinin təsiri nəticəsində müxtəlif mürəkkəbləşmələrə məruz qalan lay-quyu-yerüstü avadanlıq sistemidir. Tədqiqatın predmeti isə qaz hasilatı sistemində baş verən faza çevrilmələri, onların səbəb olduğu proseslərin diaqnostikası və proqnozu üçün tətbiq edilən süni intellekt modelləri, həmçinin bu modellərə inteqrasiya olunmuş quyu idarəetmə texnologiyasıdır.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Dissertasiya işinin əsas məqsədi təbii qaz və qazkondensat yataqlarının istismarı zamanı lay-quyu-yerüstü sistemində baş verən faza çevrilmələrinin fiziki və termodinamik mahiyyətini müəyyən etmək, onların diaqnostikası üçün daha dəqiq modellər hazırlamaq və bu modelləri quyuların idarəetmə texnologiyalarına inteqrasiya etməklə hasilatın səmərəliliyini artırmaqdır.

Tədqiqat çərçivəsində nəzəri, praktiki və eksperimental təhlillər əsasında qeyri-stabil qaz hasilatı quyularının istismar yavaşmaları təkmilləşdirilir və səmərəli idarəetmə üçün elmi əsaslar formalaşdırılır.

Həmçinin, istismar problemlərinin erkən proqnozlaşdırılması məqsədilə süni intellekt modelləri tətbiq edilir. Təzyiq və hasilat sərfi məlumatları əsasında yeni ağıllı özünü idarəetmə sistemi texnologiyasının inteqrasiyası ilə qaz hasilatı quyularının iş rejimlərinin avtomatik optimallaşdırılması tədqiqatın əsas vəzifələrini təşkil edir.

Tədqiqatın metodları. Qaz və qazkondensat yataqlarının istismarı zamanı lay-quyu sistemində baş verən faza çevrilmələri, retroqrad kondensasiya, quyunun maye ilə yüklənməsi və digər fəsadların tədqiqi fiziki-termodinamik və statistik metodların kompleks tətbiqi əsasında aparılmışdır. Qazkondensat sistemlərinin faza münasibətləri PVT və lay modellərində aparılan tədqiqat məlumatlarına əsaslanmışdır. Real quyu məlumatları da daxil olmaqla,

quyu dibi zonada, quyu daxilində və yerüstü sistemdə baş verən proseslər qarşılıqlı müqayisəli şəkildə təhlil edilmişdir.

Qaz hasilatı quyularının maye ilə yüklənməsinin və hasilat rejimlərinin proqnozlaşdırılması məqsədilə istismar göstəricilərinə əsaslanan məlumat əsaslı maşın öyrənməsi yanaşmaları tətbiq edilmişdir. Bu çərçivədə qərar ağacı və süni neyron şəbəkəsi modelləri real vaxt və hasilat tarixi məlumatları əsasında qurulmuş və təlimləndirilmiş, proqnoz nəticələri isə statistik təhlil üsulları ilə qiymətləndirilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. Təbii qaz və qazkondensat yataqlarının istismarı zamanı lay–quyu–texnoloji blok sistemi boyunca baş verən faza çevrilmələri və kolloid-dispers halın formalaşması proseslərinin elmi əsasları və hasilat quyusunun işinə təsirinin əsaslandırılması.

2. Süni intellekt modellərinin tətbiqi vasitəsilə qaz hasilatı quyularında istismar problemlərinin ilkin mərhələdə dəqiq müəyyən edilməsi, erkən xəbərdarlıq və operativ idarəetmə tədbirlərinin işlənilməsi.

3. Məhdud məlumat şəraitində quyunun təzyiqi və hasilat sərfinin zaman üzrə dəyişmə dinamikasını əks etdirən məlumatların GRU modeli vasitəsilə emalı və analitik dəqiqliyin artırılması.

4. Ağillı özünüidarəetmə sistemlərindən istifadə edərək quyuda baş verən prosesləri nəzərə alan, özünü optimallaşdıran idarəetmə texnologiyasının işlənilməsi.

Tədqiqatın elmi yeniliyi.

1. Təbii qaz və qazkondensat yataqlarının istismarı zamanı lay–quyu–texnoloji blok sistemi boyunca baş verən faza çevrilmələri kompleks şəkildə tədqiq edilmiş və əldə olunan nəticələr əsasında mövcud elmi biliklər genişləndirilmişdir;

1.1. Qaz hasilatı quyularında təzyiqin bərpası ayrisinin formalaşmasında faza çevrilmələrinin rolu qiymətləndirilmiş və erkən mərhələdə müşahidə olunan sıçrayışların termobarik mühitin təsiri ilə axın sistemində fazalar nisbətinin dəyişməsi və quyu-lay boyu yenidən paylanması ilə əlaqədar olduğu əsaslandırılmışdır.

1.2. Qazkondensat yataqlarında quyu dibi zonada süzülmə prosesinin elmi mahiyyəti dərinləşdirilmiş və ənənəvi üçzonalı

yanaşmaya əlavə olaraq aerosol və dispers hal zonasını nəzərə alan dörd zonalı quyu dibi modeli təklif edilmişdir. Bu model istismar proseslərinin daha dəqiq qiymətləndirilməsinə imkan yaratmışdır.

2. Qaz hasilatı quyularının maye ilə yüklənməsinin erkən diaqnostikası məqsədilə quyu parametrlərinin zaman üzrə dəyişmə dinamikasına əsaslanan maşın öyrənməsi və süni intellekt modelləri işlənmişdir. Bu modellərin qeyri-xətti və gizli qanunauyğunluqları aşkar etməklə daha dəqiq diaqnostika və proqnozlaşdırma imkanları təsdiq edilmişdir.

3. Məhdud məlumat şəraitində qaz sərfinin (və ya quyuagzı təzyiqinin) malik olduğu mühüm məlumatların realizə edilməsi məqsədilə zaman ardıcılığına əsaslanan GRU tipli dərin öyrənmə modeli təklif edilmiş və bu modelin quyudibi parametrlər məlum olmadıqda belə quyularda baş verən nasazlıqların effektiv diaqnostikası üçün əlverişli yanaşma olduğu göstərilmişdir.

4. Ağıllı özünüidarəetmə prinsiplərinə əsaslanan modellərin integrasiya olunmuş tətbiqi ilə quyuda baş verən prosesləri nəzərə alan və özünü optimallaşdıran idarəetmə mexanizmi işlənmiş və bunun əsasında qaz hasilatı quyularının iş rejimlərinin avtomatik tənzimlənməsi texnologiyası təklif edilmişdir.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti. Təqdim olunan nəticələr göstərir ki, dissertasiya işi lay–quyu–yerüstü avadanlıqlar sistemi boyunca baş verən faza çevrilmələri ilə əlaqədar proseslərin fundamental əsaslarını dərinləşdirməklə qaz hasilatı quyularının daha səmərəli idarə olunması üçün elmi əsaslar formalaşdırmışdır. Eyni zamanda, süni intellekt modellərinin qaz hasilatı quyularında tətbiqi imkanları araşdırılmış və onların istismar proseslərinin təhlili və proqnozlaşdırılmasında effektiv alət olduğu göstərilmişdir.

Tədqiqat nəticəsində əldə edilən elmi nəticələr yalnız yerli materiallarla deyil, həmçinin müxtəlif ölkələrə məxsus yataqların faktiki göstəriciləri əsasında da yoxlanılmışdır. Araşdırma zamanı həm nəzəri yanaşmalara, həm də müasir elmi nəticə və mülahizələrə istinad edilmiş, əldə olunan nəticələr real eksperimental və praktiki məlumatlarla müqayisə edilərək onların etibarlılığı və elmi əsaslılığı təsdiq edilmişdir.

Dissertasiya işində irəli sürülən innovativ texnoloji həllər və süni intellektə əsaslanan modellər fəaliyyət göstərən quyuların geniş məlumat bazası əsasında qurulmuş və praktiki məlumatlar üzərində sınaqdan keçirilmişdir ki, bu da əldə olunan nəticələrin tətbiqi əhəmiyyətini artırır.

Tədqiqatın nəticələri Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Neft və Qaz İnstitutunun “Lay sistemlərinin hidroqazdinamikası” laboratoriyasında aparılan elmi işlərdə istifadə olunmuş və institutun illik hesabatında öz əksini tapmışdır.

Bundan əlavə, müəllif həmmüəlliflərlə birlikdə SOCAR və “Partnyor Elmi İnkişafa Dəstək” İctimai Birliyi arasında imzalanmış müqavilə çərçivəsində təşkil olunan qrant müsabiqəsinin qalibi olmuşdur. 2023-cü ildə 22TP-23LR nömrəli müqavilə əsasında tədqiqatçılar qrupu tərəfindən icra edilən “Tükənmə rejimində istismar olunan qazkondensat yataqlarında lay xüsusiyyətləri nəzərə alınmaqla məhsuldarlığın artırılması yolları” mövzusunda layihə uğurla müdafiə edilmiş və tətbiq üçün SOCAR-a təqdim olunmuşdur.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiya işinin əsas müddəaları Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Neft və Qaz İnstitutunun Elmi Şurasında müzakirə olunmuş, əldə edilən nəticələr müsbət qiymətləndirilmiş və tətbiq üçün tövsiyə edilmişdir. “Qazkondensat yataqlarının işlənməsi zamanı maye və qaz fazalarının qarşılıqlı həllolma prosesləri və onların idarə edilməsi yolları” mövzusunda aparılan tədqiqatın nəticələri həmin institutun 2024-cü il üzrə ən mühüm elmi nəticələri siyahısına daxil edilmişdir.

Tədqiqat üzrə alınan əsas nəticələr 2026-cı ildə “Süni intellekt modellərinin qaz hasilatı quyularının “özünü optimallaşdırma” texnologiyalarına tətbiqi məsələləri” mövzusu üzrə hazırlanmış elmi seminarı ADNSU-da həyata keçirilmiş və qoyulan məsələlər maraqla qarşılanmışdır.

Dissertasiya işinin məzmunu üzrə əsas müddəalar aşağıdakı beynəlxalq elmi konfrans və forumlarda müzakirə edilmişdir:

- International Scientific Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of National Leader Heydar Aliyev (Baku, Azerbaijan. 2023);

- Ümummilli Lider Heydər Əliyevin 100 illik yubileyinə həsr olunmuş tələbələrin 72-ci elmi-texniki konfransı (2023. s. 123–131);
- Science in the Modern World: Innovations and Challenges (Toronto, Canada. 2024);
- IV International Ordu Scientific Research Congress (Ordu, Türkiyə. 2025. p. 596–604);
- The Sixth International Student Research and Science Conferences (Baku, Azerbaijan. 2025. p. 163–167);
- 21st International Petroleum and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey (IPETGAS 2023) (Ankara, Türkiyə. 2023. p. 663–669).

İşin dərc olunması. Dissertasiya işinin əsas məzmunu müəllif tərəfindən dərc olunmuş 15 elmi əsərdə, o cümlədən 9 elmi məqalədə və 6 konfrans materialında öz əksini tapmışdır. Məqalələrin nəşr olunduğu jurnallar Azərbaycan Respublikasının AAK-nın tələblərinə uyğun olaraq seçilmişdir. Bu məqalələrdən 3-ü Web of Science (WoS) indeksli elmi jurnallarda dərc edilmişdir.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. Dissertasiya işi Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetində yerinə yetirilmişdir. Bununla yanaşı, tədqiqatların bir hissəsi Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyinin Neft və Qaz İnstitutunun “Lay sistemlərinin hidroqazdinamikası” laboratoriyasında həyata keçirilmişdir.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi. Dissertasiya işi giriş, 4 fəsil, nəticə, 168 adda istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. İşin ümumi həcmi 37 şəkil, 11 cədvəl, ədəbiyyat siyahısı daxil olmaqla ümumilikdə 166 səhifədir.

Dissertasiya işinin həcmi: giriş 10921 işarə, I fəsil 61086 işarə, II fəsil 50813 işarə, III fəsil 58714 işarə, IV fəsil 52618 işarə və nəticə 3102 işarə olmaqla ümumilikdə 237254 işarədən ibarətdir.

İŞİN ƏSAS MƏZMUNU

Girişdə dissertasiya işinin məqsədi və vəzifələri təqdim edilmiş, mövzunun aktuallığı, elmi və praktiki əhəmiyyəti, eləcə də tədqiqatın aparılmasının zəruriliyi əsaslandırılmışdır. Qeyd olunmuşdur ki, qaz və qazkondensat quyularının hasilat səmərəliliyinin artırılması məqsədilə elmi fundamental prinsiplərə əsaslanan texnoloji idarəetmə sistemlərinin işlənməsi yüksək perspektivə malikdir. Bu baxımdan, həmin istiqamətdə aparılan tədqiqatlar aktual elmi-texniki məsələlər sırasına daxildir.

Birinci fəsildə təbii qaz və qazkondensat yataqlarının işlənməsi zamanı lay–quyu–texnoloji avadanlıqlar sistemində baş verən faza çevrilmələrinin hasilat prosesinə təsiri üzrə mövcud nəzəri və praktiki tədqiqatlar təhlil edilmişdir. Araşdırmalar göstərmişdir ki, faza çevrilmələri hidrodinamik proseslərə, axın rejiminə və hasilat dinamikasına birbaşa təsir göstərən əsas amillərdəndir¹. Bu baxımdan onların düzgün qiymətləndirilməsi və mövcud elmi-praktiki yanaşmaların daha da təkmilləşdirilməsi mühüm əhəmiyyət daşıyır.

Müəyyən edilmişdir ki, qaz hasilatı zamanı təbii qazın tərkibindəki maye komponentlərin quyu dibi zonasında və quyu lüləsində çökməsi qaçılmaz prosesdir. Tədqiqatlar göstərir ki, xüsusilə qazkondensat yataqlarında retrograd kondensasiya nəticəsində quyu dibi zonasında kondensatın toplanması nisbi keçiriciliyin azalmasına, axının qeyri-sabitləşməsinə, dövrü maye yüklənməsinə, təzyiq döyüntülərinin yaranmasına və hasilat itkilərinin artmasına səbəb olur².

Təcrübi məlumatlar və ədəbiyyat mənbələrinin müqayisəli təhlili göstərir ki, bu təzyiq döyüntüləri yalnız quyu dibi zonaya deyil, həm də lay daxilində gərginliklərin dövrü dəyişməsinə təsir edərək kollektor süxurların və quyu konstruksiyasının etibarlılığını azalda bilər. Axın parametrlərinin böyük amplitudada və qeyri-sabit tezliklə dəyişməsi yerüstü avadanlıqların istismarına da mənfi təsir göstərir. Buna görə də təzyiq və temperatur dəyişmələrinin, faza

¹ Coskuner, G. Production optimization of liquid loading gas condensate wells: a case study // *Journal of Canadian Petroleum Technology*. – 2003, 42 (11).

² Lea, J.F., Nickens, H.V. Solving gas-well liquid-loading problems // *Journal of Petroleum Technology*. – 2004, 56 (4), – p. 30–36.

çevrilmələrinin axın rejiminə təsirinin kompleks qiymətləndirilməsi və quyu sisteminin real şəraiti əks etdirən modellərlə təsviri hasilatın optimallaşdırılması və təhlükəsiz istismarın təmin edilməsi baxımından mühüm elmi-praktiki əhəmiyyət kəsb edir. Ümumiyyətlə isə belə yataqların istismarında əsas məqsəd qeyd edilən təzahürlərin qarşısını almaq deyil, onun təsirini minimuma endirən və quyunun təhlükəsiz, səmərəli işləməsini təmin edən idarəetmə üsullarının tətbiqidir. Belə quyuların inkişaf etmiş özünüidarəetmə sistemləri ilə təchiz edilməsi həm hasilatın optimallaşması, həm də təhlükəsiz və etibarlı istismar üçün zəruri hesab olunmalıdır.

Aparılmış araşdırmalar nəticəsində real təbii qaz yataqlarında hasilat zamanı hidratların yaranma ehtimalının aşağı olduğu müəyyən edilmişdir. Buna baxmayaraq, quyuların işə salınması, bağlanması və istismarı zamanı yerli soyuma zonalarında bu riskin mövcudluğu göstərilmişdir ³. Hidratların əmələ gəlməsi axın en kəsinin daralmasına, təzyiq itkilərinin artmasına, hasilatın azalmasına və avadanlığın işinin pozulmasına səbəb ola bilər. Problemin qarşısını almaq üçün kimyəvi inhibitorlar, istiliklə təsir, texnoloji təmizləmə və digər üsullardan istifadə edilsə də, dissertasiya işində hidrat əmələgəlmə riskinin baş verməzdən əvvəl diaqnostika edilə bilməsi məqsədilə bu riskin quyuların idarəetmə modelləri və texnologiyalarında nəzərə alınmasının vacibliyi vurğulanmışdır.

Faza çevrilmələri nəticəsində quyu dibi zonada və quyu lüləsində yaranan maye yığılmasının idarə edilməsi üçün müxtəlif texnoloji yanaşmalar qarşılıqlı şəkildə müqayisə edilmişdir. Məlumdur ki, quyu dibi zonasında əsas məqsəd çökmüş kondensatın yenidən hərəkətə gətirilməsi, maye tıxacının aradan qaldırılması və lay-quyu hidrodinamik əlaqəsinin yaxşılaşdırılmasıdır, bu məqsədlə əsasən qaz vurulması, dövrü təzyiq depresiyası, kimyəvi reagentlər və fiziki təsir üsullarından istifadə edilir. Quyu lüləsində isə qaz lift, kimyəvi reagentlər, plunjer lift, hasilat nasosları və quyu konstruksiyasının optimallaşdırılması kimi üsullar mayenin səthə çıxarılmasını asanlaşdıraraq axının sabitliyini və hasilatın

³ Chen, D. Gas-Liquid Flow Pattern and Hydrate Risk in Wellbore during the Deep-Water Gas-Well Cleanup Process / Sun, Z. et al. // ACS Omega. – 2023, – 8 (14), – p. 12911–12921.

davamlılığını təmin edir. Hər iki halda tətbiq ediləcək texnologiyanın seçimi layın xüsusiyyətləri, quyu şəraiti və texniki-iqtisadi göstəricilər nəzərə alınmaqla müəyyən edilməlidir⁴. Bu isə daha dəqiq diaqnostika və daha çevik idarəetmə sistemlərinin tətbiqini zəruri edir.

Beləliklə, bu fəsil üzrə əldə olunan nəticələr göstərir ki, qaz və qazkondensat yataqlarında faza münasibətləri ilə bağlı termodinamik proseslərin dərinədən öyrənilməsi və onların hidrodinamik təsirlərinin qiymətləndirilməsi hasilat quyularının optimallaşdırılması və təhlükəsiz istismarının təmin edilməsi baxımından mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Eyni zamanda bu məlumatların müasir analitik və rəqəmsal idarəetmə modellərinə inteqrasiyası həm elmi, həm də praktiki baxımdan vacibdir.

İkinci fəsildə qaz və qazkondensat quyularında hasilatın azalmasına və axının qeyri-sabitləşməsinə səbəb olan əsas mürəkkəbləşmələr kompleks şəkildə təhlil edilmiş, onların yaranma mexanizmləri və idarə olunması istiqamətləri əsaslandırılmışdır.

Mədən təcrübəsi göstərir ki, qaz və qazkondensat quyularında baş verən mürəkkəbləşmələrin aşkarlanması üçün quyu sınaqları, geofiziki və laborator analizlərlə yanaşı, istismar zamanı qeydə alınan operativ məlumatların kompleks təhlili daha məqsədəuyğundur.

Bu məqsədlə fiziki-termodinamik (quyudibi, quyuağzı, separatordakı təzyiq (P) və temperaturalar (T), flüidın sıxlığı (ρ_f)), istismar (qaz, kondensat, su və qum hasilatı (Q)), flüidın tərkibi (komponentlər (C_i), qaz amili (G_a), su amili (S_a), mexaniki qarışıqlar (M_q)) texniki (qaldırıcının (D_q), süzgəcin (S_s), nizamlayıcının (D_n), atqı xətlərinin və manifold sisteminin göstəriciləri (D_{am}) və digər fiziki təzahür (səs-küyün tezliyi (SK_t) və intensivliyi (SK_i), vibrasiya və axın təkanlarının tezliyi (VT_t) və amplitudası (VT_a)) göstəricilərinin zaman üzrə dəyişməsi qiymətləndirilə bilər (1).

(1) ifadəsi onların vahid dinamik sistem təşkil etdiyini və zamanla qarşılıqlı əlaqədə dəyişdiyini göstərir. Parametrlərdə gözlənilən dinamikadan kənara çıxmalar diaqnostik əlamət kimi qəbul edilir və zəif, yaxud güclü siqnallar şəklində qiymətləndirilir. Zəif

⁴ Tugan, M.F. Deliquification techniques for conventional and unconventional gas wells: Review, field cases and lessons learned for mitigation of liquid loading // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2020, 83 (11).

siqnalların vaxtında aşkarlanması erkən müdaxilə və effektiv idarəetmə baxımından daha böyük əhəmiyyət daşıyır.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{qd}, P_{qa}, T_{qd}, T_{qa}, P_s, T_s, \rho_f = f(t) \\ Q_q, Q_k, Q_s, Q_q = f(t) \\ C_i, G_a, S_a, M_q = f(t) \\ D_q, S_s, D_n, D_{am} = f(t) \\ SK_t, SK_i, VT_t, VT_a = f(t) \end{array} \right. \quad (1)$$

Çoxkomponentli sistemlərin faza diaqramları göstərir ki, qarışıqın tərkibi ilə onun termodinamik halı arasındakı çox həssas bir əlaqə mövcuddur və tərkibdəki cüzi dəyişikliklər belə sistemin faza xüsusiyyətlərinə əhəmiyyətli təsir göstərə bilər. Cədvəl 1-də təqdim olunan sınaq qarışıqlarının komponent tərkibi əsasında qurulmuş faza diaqramı qrafik 1-də verilmişdir.

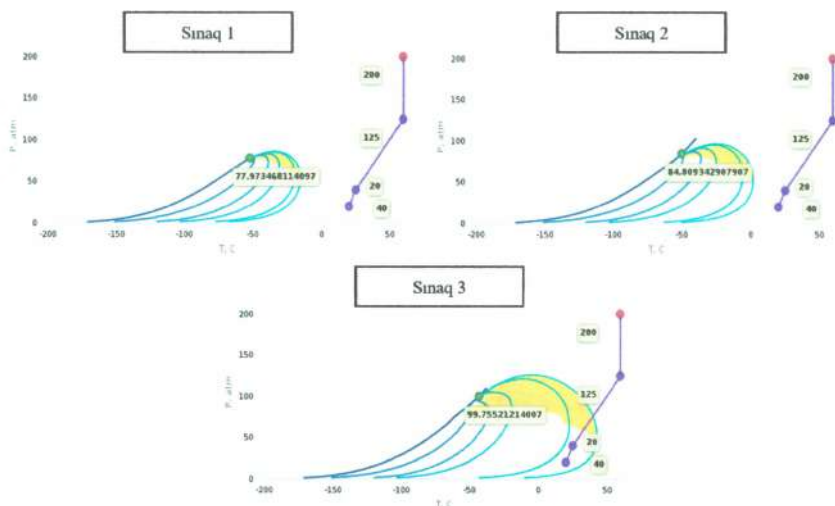
Cədvəl 1.

Sınaq üçün istifadə olunan qarışıqların komponent tərkibi

Tərkib, Mol %	Sınaq 1	Sınaq 2	Sınaq 3
N ₂	6.25	6.25	6.25
CO ₂	2.34	2.34	2.34
C ₁	80.13	80.13	80.13
C ₂	7.24	7.24	7.24
C ₃	2.35	2.35	2.35
iC ₄	0.72	0.22	0.22
nC ₄	0.85	0.35	0.35
iC ₅	0.09	0.59	0.09
nC ₅	0.03	0.53	0.03
C ₆	-	-	0.5
C ₇₊	-	-	0.5

Qrafik 1 göstərir ki, qarışıqda ağır karbohidrogenlərin miqdarının cəmi 1% artması belə faza diaqramını əhəmiyyətli dərəcədə dəyişdirərək sistemin birfazlı sahədən iki fazalı sahəyə keçməsinə səbəb olur. Mövcud ədəbiyyat və istismar təcrübəsi təbii qazlarda ağır karbohidrogenlərin miqdarının 5%-ə qədər ola biləcəyini

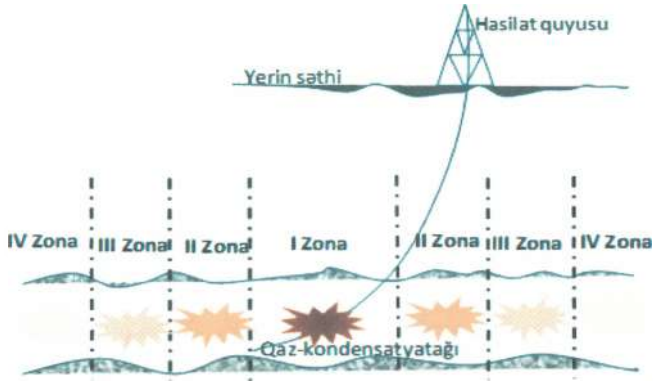
göstərir. Aparılan təhlillər sübut edir ki, üçüncü sınaqda müşahidə edildiyi kimi, ağır komponentlərin miqdarı 5%-dən aşağı olduqda belə retroqrad kondensasiya baş verə, istismar sisteminin müxtəlif hissələrində maye yığılması müşahidə oluna və sistem birfazlı haldan iki fazlı hala keçə bilər.



Qrafik 1. Müxtəlif karbohidrogen tərkibli qarışıqların faza halının P-T diaqramı

Bircins mühitdə quyu dibinə süzülmə prosesi diffuziya tənliyi əsasında təhlil edilmiş və süzülmə zamanı sıxlığın zamandan asılı olaraq harmonik xarakter daşdığı müəyyən edilmişdir. Bu yanma qazkondensat sistemi üçün genişləndirilmişdir. Burada qazkondensat qarışığının retroqrad kondensasiyasının məsələli mühitdə PVT bombasına nisbətən daha yüksək təzyiqlərdə başlaması əsas götürülmüşdür. Bu məqsədlə quyu dibi ətrafında dörd zonadan ibarət yeni model təklif edilmişdir (şəkil 1). Göstərilmişdir ki, bu xüsusiyyət kondensat itkilərinin artmasına və layın məhsuldarlığının azalmasına səbəb olduğundan, faza davranışının və dispers sistemlərin dayanıqlığının istismar və idarəetmə modellərində nəzərə alınması zəruri hesab edilməlidir.

Bu yanaşmaya əsasən I zona kondensat tıxacının formalaşdığı, II zona qaz və kondensatın birgə hərəkət etdiyi keçid sahəsi, III zona lay təzyiqinin retroqrad kondensasiya təzyiqinə yaxın olduğu və kondensatın dispers fazada toplanaraq maye tıxacın böyüməsinə səbəb olduğu interval, IV zona isə yalnız qaz axınının mövcud olduğu sahə kimi qəbul edilir.



Şəkil 1. Quyu dibi zonada flüidın faza dəyişməsinin sxematik təsviri

Şəkil 1-də göstərilən zonaların hər birində kondensatla doyma səviyyəsinin zaman üzrə dəyişməsi ümumi rəqslər nəzəriyyəsinə əsasən (2) ifadəsi ilə təsvir edilir:

$$S_t = S_{ai} \cos(\omega_{si}t + \varphi) \quad (2)$$

Burada S_i i-ci zonada kondensatla doyma dərəcəsinə, S_{ai} amplitudanı, ω_{si} dolub-boşalma tezliyini, t zamanı, φ isə prosesin başlanğıc fazasını ifadə edir.

Zonaların süzülmə sürəti, süzülmə sahəsi və təzyiq qradienti fərqli olduğundan, kondensatla doyma prosesinin amplitudası, tezliyi və periodu da müxtəlif olur. I zondan IV zonaya doğru bu rəqslərin tezliyi azalır və müxtəlif zonalarda yaranan dalğalanmaların üst-üstə düşməsi nəticəsində quyudibi təzyiqində mürəkkəb dəyişmələr formalaşır. Bu nəticə praktiki məlumatlarla müqayisədə öz əksini

tapmışdır. Nümunə kimi qazkondensat hasilatı quyusunun quyudibi təzyiqinin zamandan asılılığı qrafik 2-də verilmişdir.



Qrafik 2. Quyudibi təzyiqin zamandan asılı olaraq dəyişməsi

Beləliklə, quyudibi təzyiqin dəyişməsində zamandan asılı olaraq müxtəlif amplitudaya, tezliyə və perioda malik olan dalğalanmaların səbəbi izah edilmiş və bunun ciddi problem kimi quyuların idarə edilməsi texnologiyalarında nəzərə alınması təklif edilmişdir.

Ümumilikdə, qaz axını zamanı mayenin mövcudluğu iki fazlı axın rejimi yaradaraq klassik modellərdən kənarlaşmalara və məlumatların interpretasiyasında çətinliklərə səbəb olur. Bu səbəbdən problemin həlli kompleks yanaşma tələb edir. İstismar göstəricilərinin davamlı izlənməsi və təzyiq bərpa sınaqlarının düzgün təhlili həm proseslərin daha dəqiq qiymətləndirilməsinə, həm də onların effektiv idarə olunması üsullarının seçilməsinə imkan yaradır.

Aparılan təhlillər göstərir ki, istismar quyusu bağlandıqdan sonra axın dinamikasında baş verən dəyişikliklər, flüidın tərkibi, faza dəyişmələri, təzyiq və temperaturla bağlı həcmi münasibətlər quyudibi təzyiqinin zamandan asılı olaraq qeyri-monoton xarakter almasına səbəb olur. Bu proseslərin əsas xüsusiyyətləri aşağıdakılardır:

1. Qaz amili $90 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -dən, xüsusilə $350 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -dən yüksək olduqda təzyiq bərpası qeyri-monoton xarakter alır.

2. İlk 0–1 saatda təzyiq pik qiymətə çatır, 1–2 saatda fazaların yenidən paylanması nəticəsində azalır, təxminən 5 saatdan sonra işə stabilləşir.

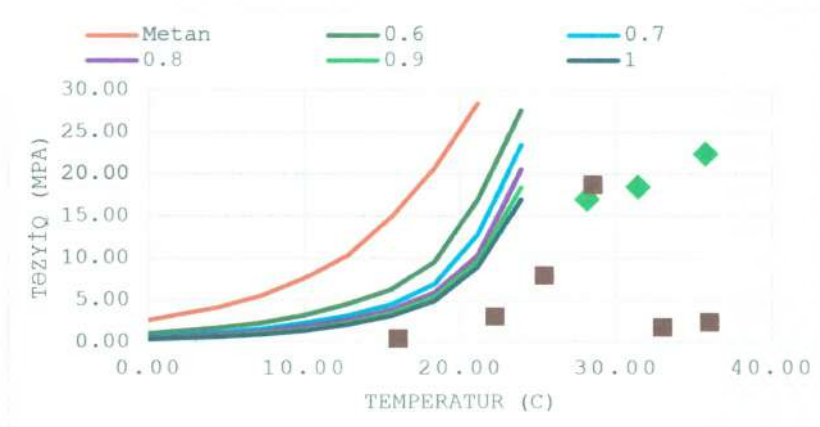
3. Su amili 15–20%-dən çox olduqda fazaların yenidən paylanması iki mərhələdə baş verir və stabilləşmə müddəti uzanır.

Bu qeyri-monoton dəyişmələrin fiziki mahiyyəti ondan ibarətdir ki, quyu bağlandıqdan sonra laya daxil olan flüid yalnız təzyiqin artmasına sərf olunmur, eyni zamanda quyu daxilində baş verən həcm dəyişikliklərini də kompensasiya edir. Bu qarşılıqlı təsir aşağıdakı həcm balansı ilə ifadə olunur:

$$\begin{aligned} V_{doh} &= V_{qdzd} + V_{qdzda} + V_{qgd} + V_{qggh} - V_{qgsh} \text{ və } V_i \\ &= f(P, T, C) \end{aligned} \quad (3)$$

Burada V_{doh} quyuya daxil olan flüid həcmi, digər hədlər isə müvafiq olaraq quyu dibi zonanın həcmi (V_{qdzd}), quyu dibi zonanın deformasiya olunmuş həcmi (V_{qdzda}), quyu gövdəsinin həcmi (V_{qgd}), quyuda genişlənmiş hissəsinin həcmi (V_{qggh}) və flüidin sıxılan həcmi (V_{qgsh}) ifadə edir. Həcm parametrlərinin təzyiq, temperatur və flüidin tərkibindən asılı olması göstərir ki, təzyiq bərpası yalnız lay axını ilə deyil, həm də bu proseslərin birgə təsiri ilə formalaşır. Bu amillərin nəzərə alınmaması hidrodinamik parametrlərin qiymətləndirilməsində əhəmiyyətli xətalara səbəb ola bilər.

Praktiki məlumatlar əsasında aparılan tədqiqatlar göstərir ki, qaz hasilatı quyularının normal istismar şəraitində hidrat əmələgəlməsi nadir hallarda müşahidə olunur. Qrafik 3-də təqdim olunan təzyiq–temperatur analizinə əsasən, həm stabil, həm də debit azalması müşahidə olunan qeyri-stabil quyuların istismar nöqtələri hidrat sabitlik əyrlərinin təhlükəsiz tərəfində yerləşir və adətən 3.5–70 MPa quyuağzı təzyiqi, 20–120°C temperatur intervalında hidrat riski yaranmır. Lakin keçid rejimlərində, lokal soyuma zonalarında və xüsusilə quyuağzı nizamlayıcısından sonrakı təzyiq düşmələri zamanı hidrat yaranma ehtimalı arta bilər. Buna görə də, hidratların yaratdığı fəsadlar ağır nəticələrə səbəb ola bildiyindən bu risk həmişə nəzərə alınmalı, quyuların layihələndirilməsi zamanı texnoloji, termiki və kimyəvi qarşısının alınma üsulları əvvəlcədən planlaşdırılmalıdır. İstifadə edilən hər hansı üsulun rəşional, vaxtında və məqsədyönlü tətbiqi isə onun səmərəliliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır.



Qrafik 3. Qaz quyularında hidrat əmələgəlmə şəraitinin təzyiq–temperatur analizi

Aparılan təhlillər göstərir ki, qaz hasilatı quyularında problemlərin yalnız yarandıqdan sonra aşkarlanaraq aradan qaldırılması səmərəli yanaşma hesab edilə bilməz. Səmərəlilik və təhlükəsizlik baxımından daha optimal yanaşma quyuda baş verə biləcək fəsadların əvvəlcədən proqnozlaşdırılması və onları xarakterizə edən zəif siqnalların vaxtında aşkarlanmasıdır.

Üçüncü fəsildə qaz hasilatı quyularının maye ilə yüklənməsinin erkən diaqnostikası və proqnozlaşdırılması üzrə müxtəlif yanaşmaların elmi-praktiki çatışmazlıqları araşdırılmış və onların aradan qaldırılması üçün yeni modellər təklif edilmişdir.

Təcrübi və klassik nəzəri məlumatlar əsasında müəyyən edilmişdir ki, qaz və qazkondensat quyularının maye ilə yüklənməsi dinamik proses olub, erkən mərhələdə fiziki və hidrodinamik parametrlərdə özünü büruzə verir. Belə ki, hasilat quyusunun qaz və maye sərfi, təzyiq və temperaturun harmonik dəyişməsi, akustik və vibrasiya anomaliyaları mühüm diaqnostik siqnallar kimi qəbul edilə bilər. Lakin bu əlamətlərin müxtəlif səbəblərdən baş verməsinin mümkünlüyü və dəyişikliyin ilkin anda qeydə alınması, dəqiq diaqnostikası və proqnozu mövcud üsullarla icra oluna bilmir və ya ciddi xətalara nəticələnir.

Klassik nəzəri və empirik modellər təhlil edilmiş, onların çoxfazlı axının mürəkkəbliyi, müxtəlif quyu və yataq şəraitləri, fluid mexanikasının nəzəri məsələlərinin çətinlikləri və həmçinin məlumat çatışmazlığı səbəbindən məhdud imkanlara malik olduğu müəyyən edilmişdir. Bu amillər universal və etibarlı model qurulmasında yaranan çətinliklərin əsas səbəbləri kimi qeyd edilmişdir.

Klassik modellərin məhdudiyyətlərini aradan qaldırmaq məqsədilə qərar ağacı algoritmi tətbiq edilmişdir. Alqoritm qaz sərfi və quyuagzı təzyiqi arasındakı qeyri-xətti əlaqələri sadə "əgər-onda" qərar qaydaları şəklində təqdim edərək nəticələrin asan izah olunmasına imkan verir.

$$Gini\ indeks\ (t) = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (4)$$

Burada t ağacın cari düyünü, p_i^2 isə hər bir sinfə aid nümunələrin payını ifadə edir. Gini indeksi düyünün qeyri-müəyyənlik dərəcəsini qiymətləndirir və ən kiçik Gini qiymətini verən bölünmə seçilərək verilənlər ən yaxşı şəkildə qruplaşdırılır. Bundan əlavə, yüksək hesablama sürəti və mürəkkəb riyazi hesablamalara ehtiyac duymaması onun praktik tətbiqini daha da əlverişli edir.

Model 228 nümunədən ibarət verilənlər bazası əsasında qurulmuş, məlumatların 70%-i təlim, 30%-i isə müstəqil sınaq üçün ayrılmışdır. Aparılan sınaqlar nəticəsində model 80% təsnifat dəqiqliyi nümayiş etdirmiş və qaz hasilatı quyularında maye yüklənməsinin operativ diaqnostikası üçün ənənəvi üsullarla müqayisədə daha etibarlı yanaşma olduğunu göstərmişdir. Qaz sərfi (Q) və quyuagzı təzyiqi (P) giriş parametrləri əsasında qurulan birinci qərar ağacının qərarvermə qaydası aşağıdakı riyazi ifadə ilə təqdim olunmuşdur:

$$MY = \begin{cases} 1, & Q \leq 15078.45 \text{ və } P \leq 6.85 \\ 0, & Q \leq 15078.45 \text{ və } P > 6.85 \\ 1, & 15078.45 < Q \leq 75365.30 \text{ və } P \leq 19.65 \\ 0, & 15078.45 < Q \leq 75365.30 \text{ və } P > 19.65 \\ 0, & Q > 75365.3 \end{cases} \quad (5)$$

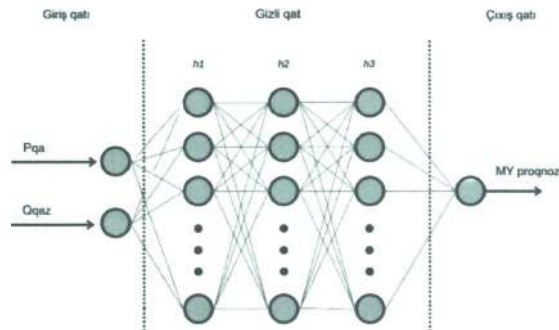
Burada modelin çıxışı MY dəyişəni ilə ifadə edilir və MY=1 olduqda quyunun maye ilə yükləndiyi, MY=0 olduqda isə normal iş rejimində olduğu qəbul edilir. (5) ifadəsi göstərir ki, model əvvəlcə qaz sərfini müəyyən intervallara ayırır, daha sonra isə hər interval üçün quyuagzı təzyiqini qiymətləndirərək son qərarı formalaşdırır.

Çoxfazlı axın proseslərinin mürəkkəb qeyri-xətti xarakteri qərar ağacının imkanlarını məhdudlaşdırdığından, daha yüksək proqnoz dəqiqliyinə nail olmaq məqsədilə süni neyron şəbəkəsi tətbiq edilmişdir. Model giriş parametrləri arasındakı mürəkkəb qeyri-xətti əlaqələri (6) ifadəsində göstərildiyi kimi öyrənərək onların birgə təsiri əsasında maye ilə yüklənmənin baş vermə ehtimalını proqnozlaşdırır.

$$y = f(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b) \quad (6)$$

Burada x_i quyuagzı təzyiq və qaz sərfi kimi giriş parametrlərini, w_i çəki əmsallarını, b sapmanı, f aktivləşdirmə funksiyasını, y isə modelin proqnozunu ifadə edir.

Model eyni 228 nümunədən ibarət verilənlər bazası əsasında qurulmuş, məlumatların 85%-i təlim, 15%-i isə müstəqil sınaq üçün ayrılmışdır. Beşqatlı neyron şəbəkəsində ReLU və Sigmoid aktivləşdirmə funksiyaları, Adam optimallaşdırıcısı və 150 öyrətmə dövrü istifadə edilmişdir. Şəkil 2-də qurulmuş süni neyron şəbəkəsinin ümumi arxitekturası təqdim edilmişdir.



Şəkil 2. Beş qatlı neyron şəbəkəsi sisteminin arxitekturası

Şəbəkə giriş, gizli və çıxış qatlarından ibarətdir. Giriş qatında ilkin məlumatlar qəbul olunur, gizli qatlarda müxtəlif çevrilmələr vasitəsilə emal edilir, çıxış qatında isə yekun proqnoz formalaşdırılır. Müxtəlif giriş parametrlərini əhatə edən dörd model arasında quyu ağzı təzyiqi və qaz sərfini birlikdə istifadə edən model 80% təsnifat dəqiqliyi ilə ən yaxşı nəticə göstərmişdir. Sonrakı müqayisələr süni neyron şəbəkəsinin mürəkkəb məlumat topluları üzərində qərar ağacından daha yüksək proqnoz dəqiqliyi nümayiş etdirdiyini, lakin nəticələrinin izahının daha çətin olduğunu göstərmişdir.

Təklif olunan modellərin qiymətləndirilməsi məqsədilə Coleman və Veeken tərəfindən təqdim edilmiş iki müstəqil məlumatlar toplusu üzərində müqayisəli təhlil aparılmışdır. Coleman-un 50 şaquli qaz quyusundan ibarət məlumatlar toplusu üzrə əldə edilmiş nəticələr Cədvəl 2-də təqdim olunmuşdur. Bu məlumatlar əsasında klassik modellər aşağı dəqiqlik göstərmişdir: Turner modeli 38%, Li modeli 4%, Chen modeli isə 0% nəticə əldə etmişdir. Liu modeli 65% dəqiqlik nümayiş etdirmişdir. Təklif olunan I və II qərar ağacı modelləri müvafiq olaraq 84% və 88%, SNŞ modeli isə 90% dəqiqlik göstərərək ən yüksək nəticəni əldə etmişdir.

Cədvəl 2.

**Coleman-un məlumatlar toplusu üzrə fərqli modellərin
proqnoz nəticələri**

	Turner və b. (1969)	Li və b. (2001)	Chen və b. (2016)	Liu və b. (2018)	I qərar ağacı modeli	II qərar ağacı modeli	SNŞ modeli
Doğru proqnozların sayı (ədəd)	19/50	2/50	0/50	22/34	42/50	44/50	45/50
Doğru proqnozların faizi (%)	38%	4%	0%	65%	84%	88%	90%

Veeken-in 67 əsasən maili qaz quyusundan ibarət məlumatlar toplusu üzrə nəticələr isə Cədvəl 3-də verilmişdir. Bu məlumatlar əsasında Turner və Li modelləri heç bir halı düzgün proqnozlaşdırma bilməmiş, Chen modeli 5%, Liu modeli isə 84% dəqiqlik göstərmişdir.

Təklif olunan qərar ağacı modelləri 78%, SNŞ modeli isə 82% dəqiqlik əldə etmişdir.

Cədvəl 3.

**VeeKen-in məlumatlar toplusu üzrə fərqli modellərin
proqnoz nəticələri**

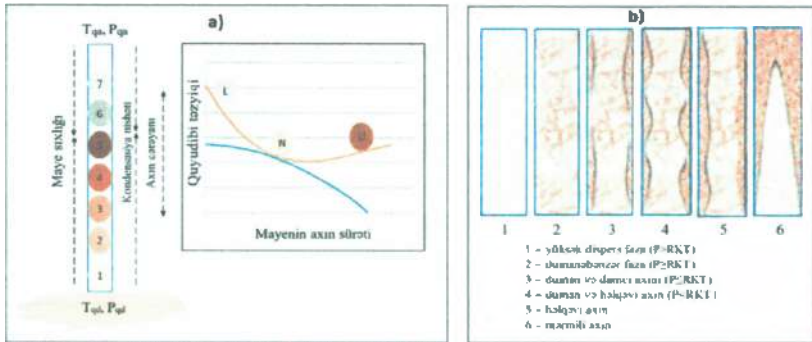
	Turner və b. (1969)	Li və b. (2001)	Chen və b. (2016)	Liu və b. (2018)	I qərar ağacı modeli	II qərar ağacı modeli	SNŞ modeli
Doğru proqnozların sayı	0/67	0/67	3/67	56/67	52/67	52/67	55/67
Doğru proqnozların faizi	0%	0%	5%	84%	78%	78%	82%

Göründüyü kimi, təklif olunan modellərin effektivliyi əsasən keyfiyyətli və etibarlı məlumatların mövcudluğundan asılıdır. Lakin tükənmiş yataqlarda və uzun müddət istismarda olan quyularda bu cür məlumatların əldə edilməsi və emalı hər zaman mümkün olmur. Bu məhdudiyyətlər təklif olunan yanaşmaların tətbiq sahəsinin genişləndirilməsi, eləcə də məlumat çatışmazlığı şəraitində etibarlılığının artırılması istiqamətində əlavə tədqiqatların aparılmasını zəruri edir.

Dördüncü fəsildə nəzəri və praktiki tədqiqatların, həmçinin qaz hasilatı quyularının daha ağıllı idarə olunmasına yönəlmiş yeni texnologiyanın yaradılması istiqamətində əldə edilmiş nəticələr təqdim edilmişdir.

Qaz quyusunda maye toplanması hidrostatik təzyiqi artıraraq quyunun normal (N) rejimdən yüklənmiş (L) rejimə keçməsinə səbəb olur. Maye sütunu çıxarıldıqda quyu yenidən N, sonra isə yüklənməmiş (U) rejimə keçir və təzyiqdə dövrü dəyişmələr yaranır. Maye tam qaldırıla bilmədikdə quyu dayanır. Təzyiq və temperaturun azalması ilə axın rejimləri ardıcıl olaraq: (1) birfazlı qaz, (2) dispers (dumanşəkilli), (3) köpüklü–dispers, (4) dispersli həlqəvi, (5) həlqəvi və (6) mərmili axına keçir (şəkil 3).

Maye ilə yüklənmə qəfil deyil, mərhələli inkişaf etdiyindən ilkin mərhələdə yaranan zəif dəyişikliklərin aşkarlanması çətinləşir. Bu isə klassik deterministik və empirik modellərin məhdudiyyətlərini göstərir və zaman asılılıqlarını öyrənən yeni diaqnostik yanaşmaların tətbiqini zəruri edir.



Şəkil 3. İstismar borusunda qazkondensat mayesinin axın rejimləri

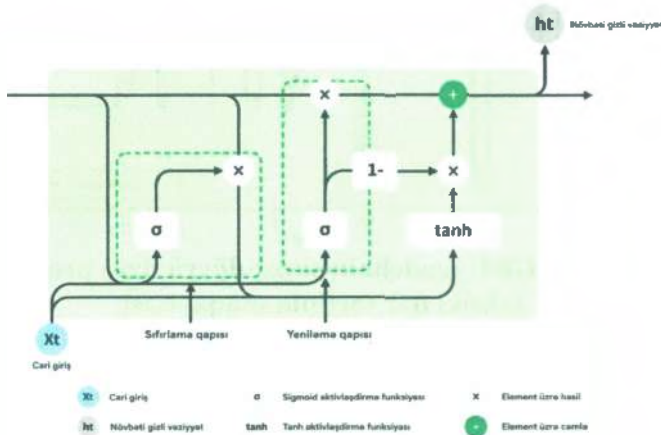
Maye ilə yüklənmə prosesi təzyiq itkiləri balansı əsasında qiymətləndirilmiş, analitik ifadələr vasitəsilə maye toplanmasının başlanma anının müəyyən edilməsi əsaslandırılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, qaz hasilatı, quyudibi və quyuagzı təzyiqlərinin zaman üzrə dəyişməsi prosesin əsas diaqnostik göstəriciləridir.

Eyni zamanda göstərilmişdir ki, məlumat çatışmazlığı şəraitində belə, bu parametrlərin zaman asılı olaraq dəyişməsi maye yüklənməsinin etibarlı diaqnostikasını təmin edir. Buna görə də problemin həlli üçün zaman ardıcılığını effektiv emal edən GRU modeli optimal yanaşma kimi seçilmişdir. Şəkil 4-də GRU hüceyrəsinin strukturu göstərilmişdir.

GRU arxitekturası sıfırlama və yeniləmə qapılarından ibarət olub, əvvəlki gizli vəziyyətdən ötürülən informasiyanın hansı hissəsinin saxlanılacağını, hansının isə yenilənəcəyini müəyyən edir. Bu proses (7) ifadəsi ilə həyata keçirilir:

$$\tilde{h}_t = (1 - z_t) \odot h_{t-1} + z_t \odot \tilde{h}_t \quad (7)$$

Burada h_{t-1} əvvəlki yaddaşı, $\tilde{h}_t$ yeni öyrənilmiş məlumatı, z_t isə bu iki məlumat arasında tarazlığı müəyyən edən yeniləmə qapısını ifadə edir. Nəticədə bu mexanizm modelə uzunmüddətli zaman asılılıqlarını öyrənməyə və hasilat göstəricilərində baş verən zəif dəyişiklikləri daha dəqiq izləməyə imkan verir. Bu yanaşma əsasında model ilk dəfə qaz hasilatı quyularında maye ilə yüklənmənin erkən proqnozlaşdırılması məqsədilə tətbiq edilmişdir.

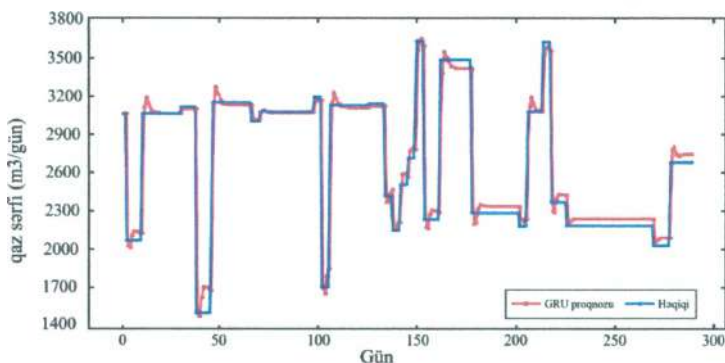


Şəkil 4. GRU hüceyrəsinin strukturu

GRU modeli təxminən 1500 günlük qaz sərfi məlumatı əsasında qurulmuş, verilənlər 1200 günlük təlim və 300 günlük sınaq hissələrinə ayrılmışdır. MinMaxScaler üsulu ilə normallaşdırılmış 10 günlük zaman pəncərəsi giriş kimi istifadə edilmiş, model isə 50, 30, 30 və 20 neyronlu dörd GRU qatından ibarət olmuşdur. Model orta kvadratik sapma 78.58, orta mütləq xəta 3.35 və orta mütləq faiz xətası 3.98% nəticələri göstərərək qaz hasilatının qısamüddətli proqnozlaşdırılması və maye yüklənməsinin erkən diaqnostikası üçün yüksək dəqiqlik nümayiş etdirmişdir.

Qrafik 4-də model proqnozları ilə faktiki qaz sərfinin müqayisəsi təqdim edilmişdir. GRU modeli sabit axın mərhələlərində faktiki hasilatı yüksək dəqiqliklə proqnozlaşdırmış, hasilat sürətindəki qəfil dəyişiklikləri isə cəmi bir günlük gecikmə ilə müəyyən etmişdir. Bu gecikmə təkrarlanan neyron şəbəkələrinin proqnozlarını əvvəlki

zaman addımlarından əldə olunan kontekst əsasında formalaşdırması ilə əlaqədardır. Buna baxmayaraq, model dəyişikliklərə sürətlə uyğunlaşaraq real vaxt rejimində monitoring və erkən xəbərdarlıq sistemləri üçün yüksək tətbiq potensialı nümayiş etdirmişdir.

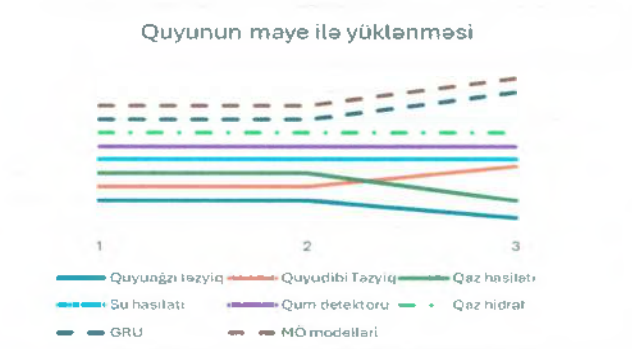


Qrafik 4. GRU modelinin sınaq dövrü üzrə proqnozları ilə faktiki qaz sərfinin müqayisəsi.

Qaz-kondensat quyularının maye ilə yüklənməsi, qum axını, hidrat əmələgəlməsi, su daxilolması, parafin və ya duz çökməsi kimi müxtəlif axın problemləri oxşar təzyiq və hasilat dəyişiklikləri ilə müşayiət oluna bilər. Bu səbəbdən yalnız ayrı-ayrı parametrlərə əsaslanan ənənəvi nəzarət üsulları problemin səbəbini dəqiq müəyyən etmək üçün kifayət etmir. Diaqnostikanın dəqiqliyinin artırılması, qeyri-stabil axın rejimlərinin erkən mərhələdə aşkarlanması və quyu iş rejiminin avtomatik optimallaşdırılması məqsədilə integrasiya olunmuş ağıllı idarəetmə sistemi təklif edilmişdir. Şəkil 5-də təklif olunan sistemin ümumi arxitekturası təqdim olunmuşdur.

Sistemdə qərar ağacı və süni neyron şəbəkəsi modelləri quyunun cari vəziyyətini real vaxt rejimində qiymətləndirərək operativ idarəetmə qərarlarını formalaşdırır, GRU modeli isə qaz hasilatının zaman üzrə dəyişməsinə təhlil edərək qeyri-stabil rejimləri və maye yüklənməsi riskini əvvəlcədən proqnozlaşdırır. Bu məqsədlə quyu ağzı cihazları, quyudibi təzyiq manometri, qum detektoru, qaz, kondensat və su sərfiölçənlərdən daxil olan məlumatlar, həmçinin

Qrafik 5-də göründüyü kimi, bu dəyişikliklər fonunda GRU və digər maşın öyrənməsi modellərinin çıxışları 0-dan 1-ə keçir və maye yüklənməsini təsdiqləyir. Bu mərhələdə sistem avtomatik olaraq nizamlayıcı klapanın (CV) mövqeyini tənzimləmək üçün idarəetmə signalı formalaşdıraraq quyunun iş rejimini optimallaşdırır.



Qrafik 5. Maye yüklənməsinin müəyyən edilməsi üçün xarakterik göstəricilər

Təklif olunan sistem yalnız maye yüklənməsini deyil, həmçinin qum axını, qaz hidratının əmələ gəlməsi, su daxil olması, parafin və duz çökməsi kimi digər qeyri-stabil axın rejimlərini də müəyyən edə bilər. Aşkarlanan problemə uyğun olaraq xəbərdarlıq və idarəetmə signalı quyu idarəetmə sistemində (WCS) ötürülür və müvafiq tədbirlər həyata keçirilir. Beləliklə, süni intellekt modelləri, sensor məlumatları və avtomatik idarəetmə mexanizmlərini birləşdirən təklif olunan sistem qaz-kondensat quyularında real vaxt rejimində diaqnostika aparmağa, maye yüklənməsini erkən mərhələdə aşkar etməyə və quyuların daha təhlükəsiz, sabit və səmərəli istismarını təmin etməyə imkan verir.

ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. Aparılmış tədqiqatların təhlili göstərmişdir ki, laydan quyu dibinə süzülmə zamanı qaz-maye sistemi maye klasterlərdən ibarət aerosol-kolloid halına keçir. Bu dispers hissəciklərin yüksək sərbəst səthi süxur dənəcikləri ilə adsorbsiya qüvvələri yaradır və nəticədə kondensatın quyunun qidalanma konturu zonasında hərəkətsiz şəkildə yığılması baş verir. Bu yanaşma əsasında ənənəvi üçzonalı modelə əlavə olaraq aerosol və dispers fazanı nəzərə alan dörd zonalı lay sistemi modeli təklif edilmişdir ki, bu da quyudibi parametrlərinin daha dəqiq qiymətləndirilməsinə imkan yaradır [1, 2, 3].

2. Tədqiqatlar göstərmişdir ki, normal istismar şəraitində qaz quyularının təzyiq və temperatur göstəriciləri adətən hidratların sabitlik zonasından sağ kənarda yerləşdiyindən hidrat əmələgəlməsi davamlı risk yaratmır. Lakin quyunun açılıb-bağlanması kimi keçid rejimlərində və ya quyu lüləsində lokal soyuma zonalarında temperaturun kəskin azalması hidrat kristallarının yaranması üçün əlverişli şərait formalaşdırır və bu səbəbdən hidrat amilinin quyuların idarə edilməsi texnologiyalarında nəzərə alınması vacib məsələlərdəndir.

3. Müəyyən edilmişdir ki, qazkondensat quyularında maye yüklənməsi qəfil baş verən hadisə deyil, zamanla artan və hasilat parametrlərində ilkin dəyişikliklərlə müşahidə olunan prosesdir. Bu fenomenin erkən diaqnostikası üçün qaz hasilatında azalma və ya sıçrayışların, təzyiq və temperatur dalğalanmalarının, akustik siqnalarda və digər fiziki göstəricilərdə baş verən anomaliyaların real vaxt rejimində izlənilməsi mühüm əhəmiyyət kəsb edir [14, 15].

4. Qazkondensat quyularında təzyiqin bərpası sınaqlarının interpretasiyası zamanı fazaların yenidən paylanması və kondensatın ayrılması təzyiq törəməsi ayrılıqlarını əhəmiyyətli dərəcədə təhrif edir. Bu səbəbdən layın keçiriciliyi və skin effekti kimi parametrlərin dəqiq təyini üçün quyunun həcm tutumu, faza çevrilmələri və sürüşmələri ilə bağlı fiziki-termiki təsirlərin nəzərə alınması vacibdir [4].

5. Qaz hasilatı quyularında maye yüklənməsinin aradan qaldırılması üsullarının (qaz lift, plunjer lift və müxtəlif hasilat nasosları və s.) səmərəliliyi quyunun konkret istismar şəraitindən asılıdır. Metodun seçilməsi zamanı lay təzyiqi, qaz-maye nisbəti və

quyu geometriyası kimi texniki-iqtisadi meyarlarla yanaşı dəqiq diaqnostika üsullarının kompleks tətbiqi vacibdir [7, 14].

6. Qaz hasilatı quyularında maye yüklənməsinin proqnozlaşdırılması üçün işlənmiş qərar ağacı və süni neyron şəbəkəsi modelləri 80–90% dəqiqlik nümayiş etdirmişdir. Bu əsaslı yanaşmalar həm şaquli, həm də maili quyularda maye yüklənməsinin başlanma anını klassik empirik modellərlə (məsələn, Turner modeli) müqayisədə daha etibarlı şəkildə müəyyən etməyə imkan verir [5, 8, 9, 10, 11, 13].

7. Yalnız qaz sərfinin zaman ardıcılığına əsaslanan GRU tipli dərin öyrənmə modeli təklif edilmişdir. Digər quyudibi və ya quyuağzı parametrlərinin mövcud olmadığı hallarda belə, bu tək dəyişənə əsaslanan model qaz hasilatı dinamikasını effektiv şəkildə əks etdirərək ani dəyişiklikləri və potensial maye yüklənməsi riskini minimal gecikmə ilə müəyyən edə bilir. Bununla yanaşı, qaz sərfi məlumatlarının etibarlı olmadığı hallarda, eyni GRU modelinin quyudibi və ya quyuağzı təzyiq məlumatları əsasında qurulması da mümkündür [12].

8. Qaz hasilatı quyularının özünü optimallaşdırma prinsipi əsasında idarə olunması üçün quyu məhsulunun tərkibi və quyudibi ilə quyuağzı təzyiqləri arasındakı fərqə əsaslanan yeni avtomatlaşdırılmış idarəetmə texnologiyası işlənmişdir. Maşın öyrənməsi və süni intellekt modelləri ilə inteqrasiya olunan bu ağıllı sistem flüid axınının stabilləşdirilməsini təmin edir və quyuda baş verən potensial nasazlıqları operativ şəkildə müəyyən edərək onun işinin optimallaşdırılmasına imkan yaradır [6, 14, 15].

Dissertasiyanın əsas məzmunu aşağıdakı işlərdə çap olunub:

1. Aliyev, K.F., Ağasıyev, Ə.E. Hasilat quyusunda döyüntülərin quyudibi zonasında süzülmə prosesinə təsirinin qiymətləndirilməsi // Ümummilli Lider Heydər Əliyevin 100 illik yubileyinə həsr olunmuş tələbələr 72-ci elmi-texniki konfransı, – 2023, – s. 123–131.

2. Aliyev, K.F., İsmayılov, R.Z. Retroqrad kondensasiya zamanı qazkondensat sistemlərinin kolloid hala keçməsinin fiziki-termodinamik mahiyyəti haqqında // PAHTEI – Proceedings of Azerbaijan High Technical Educational Institutions, – 2024, 40 (5), – p. 79–88.

3. Fətəliyev, V.M. Təbii rejimdə işlənən yataqlarda qazkondensat flüidlərinin dispers hal keçidləri və onların fiziki-termodinamik mahiyyəti haqqında / V.M. Fətəliyev, N.N. Həmidov, H.R. Abbaszadə, K.F. Aliyev // Azərbaycan Neft Təsərrüfatı, – 2024, (09), – s. 32-39.

4. Fətəliyev, V.M., Aliyev, K.F., Ələkbərov T.M. Quyularda təzyiqin bərpə dinamikasına həcm və faza dəyişməsi ilə əlaqəli təzahürlərin təsiri // PAHTEI – Proceedings of Azerbaijan High Technical Educational Institutions, – 2025, 50 (6), – p. 769–778.

5. Aliyev, K.F. Application of decision tree algorithm for accurate prediction of liquid loading in gas-condensate wells // Nafta-Gaz, – 2025, 81 (7), – p. 438–445.

6. Aliyev, K.F. An Integrated Data-Driven Intelligent Automation Framework for Predicting and Controlling Liquid Loading in Gas-Condensate Wells // Scientific Petroleum, – 2025, (02), – p. 50–57.

7. Aliyev, K.F. Evaluating the influence of well parameters on critical gas flow rates in gas-condensate wells using advanced statistical techniques // Science in the Modern World: Innovations and Challenges, – Toronto, Canada, – 2024, – p. 105–113.

8. Aliyev, K.F. Natural gas utilization based on full life cycle assessment: comparative assessment of environmental indicators of natural gas and other types of fuels // IV International Ordu Scientific Research Congress, – Ordu, Türkiyə, – 2025, – p. 596–604.

9. Aliyev, K.F. Application of deep neural networks for liquid loading forecasting in gas-condensate wells // The Sixth International

Student Research and Science Conferences, – Baku, Azerbaijan, – 2025, – p. 163–167.

10. Aliyev, K.F., Artun, E.F., Kulga, B. Evaluation of sustainability aspects of CO₂ sequestration in depleted shale reservoirs using data analytics // 21st International Petroleum and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey (IPETGAS 2023), – Ankara, Türkiye, – 2023, – p. 663–669.

11. Artun, E.F. Harnessing shale for net-zero: economic and environmental impact of CO₂ sequestration in the Marcellus shale formation / E.F. Artun, P. Guful, K.F. Aliyev [et al.] // Discover Sustainability, – 2025, 6 (189).

12. Fataliyev, V.M., Aliyev, K.F., Salimova S.A. Application of gated recurrent units for time series prediction of gas production rates // International Journal of Petrochemical Science & Engineering, – 2026, 8 (1), – p. 1–6.

13. Fataliyev, V.M., Aliyev, K.F. Predictive modeling of liquid loading in gas-condensate wells using deep neural networks // Azerbaijan Oil Industry, – 2025, 9, – p. 13–19.

14. Fataliyev, V.M., Hamidov, N.N., Aliyev, K.F. Advances in Understanding and Controlling Liquid Loading in Gas-Condensate Production Well // SOCAR Proceedings, – 2025, (2), – p. 95–103.

15. Fataliyev, V.M., Hamidov, N.N., Aliyev, K.F. Methods for optimizing the operation of a gas-condensate well under retrograde condensation condition // International Scientific Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of National Leader Heydar Aliyev, – ASOIU, Baku, 2023.

Çap olunmuş əsərlərdə müəllifin şəxsi iştirakı:

[5,6,7,8,9] sayılı işlər müəllif tərəfindən müstəqil yerinə yetirilmişdir.

[1,2,3,4,10,11,12,13,14,15] sayılı işlərdə iddiaçı məsələnin qoyuluşu, tədqiqat metodologiyasının əsaslandırılması, aparılmış tədqiqatların nəticələrinin təhlili, onların dəqiqliyinin yoxlanılması və məqalənin hazırlanması işlərini yerinə yetirmişdir.



Dissertasiyanın müdafiəsi 15 sentyabr 2026-cı il tarixində saat 11:00 Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti PHŞ-nin nəzdində fəaliyyət göstərən FD 2.03 – Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

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

Dissertasiya ilə Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti PHŞ-nin kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti PHŞ-nin rəsmi internet saytında (www.asoiu.edu.az) yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 14 August 2026-cı il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 16.07.2026

Kağızın formatı: A5

Həcm: 38064

Tiraj: 100