

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

İZAH OLUNA BİLƏN SÜNİ İNTELLEKT ÜÇÜN QEYRİ-SƏLİS SEMANTİK YANAŞMANIN İŞLƏNMƏSİ

İxtisas: 3338.01 – “Sistemli analiz, idarəetmə və informasiya işlənməsi” (verilənlərin emalı)

Elm sahəsi: Texnika elmləri

İddiaçı: **Pavel İqoreviç Kosov**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş
dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2026

Dissertasiya işi Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin “Kompüter mühəndisliyi” kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbərlər:

Texnika elmləri doktoru, professor
Lətafət Abbas qızı Qardaşova

Kompüter elmləri üzrə professor
Sesilia Zanni-Merk

Rəsmi opponentlər:

Texnika elmləri doktoru, professor
Ələkbər Əli Ağa oğlu Əliyev

Texnika elmləri doktoru, professor
Ramin Rza oğlu Rzayev

Texnika elmləri doktoru, professor
Cavanşir Firudin oğlu Məmmədov

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən FD 2.48 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

AMEA-nın müxbir üzvü,
Texnika elmləri doktoru, professor



Rafiq Əziz oğlu Əliyev

Texnika elmləri doktoru, dosent

Akif Vəli oğlu Əlizadə

Elmi seminarın sədri:

Texnika elmləri doktoru, professor

Kəmalə Rafiq qızı Əliyeva

dos. Əliyev. S.W.

Əliyev

İMZANI TƏSDİQ EDİRƏM

ADNSU-nun Elmi katibi

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı. Bu gün insan fəaliyyətinin bir çox sahələrində süni intellekt (Sİ) modellərinin mürəkkəbliyi və məhsuldarlığı artır; bu modellərin öyrənilməsi ilə maşın öyrənməsi və neyron şəbəkələri sahəsi məşğul olur. Milyardlarla parametr bu sistemlərin səmərəliliyini nümayiş etdirir ki, bu da onların səhiyyə və hüquqdan sənayeyə qədər müxtəlif sahələrdə geniş tətbiqinə gətirib çıxarmışdır. Bununla yanaşı, əsas vəzifəsi etibarlı, ədalətli və hesabətli Sİ sistemlərinin işlənilib hazırlanması və tədqiqi olan məsuliyyətli Sİ prinsiplərinə uyğun sistemlərin yaradılmasına ehtiyac da artır.

Məsuliyyətli Sİ konsepsiyası çərçivəsində «qara qutu» kimi fəaliyyət göstərən yüksək məhsuldarlıqlı, lakin qeyri-şəffaf Sİ modellərinin tətbiqi bir çox problemlər doğurur. Belə modellərin işinin əsas nəticəsi izah etmə imkanı olmayan proqnozdur. Halbuki məsuliyyətli sistemin yaradılması üçün zəruri şərt qəbul edilmiş qərarların izah edilməsi və əsaslandırılması qabiliyyətidir. Güclü Sİ modellərinin tətbiqi özlüyündə etibarlı sistemlərin yaradılması üçün kifayət şərt deyil; bu isə «qara qutu» problemini aradan qaldıra bilən izah oluna bilən Sİ (XAI) metodlarının işlənilib hazırlanması üzrə tədqiqatlara ehtiyac yaradır.

Mövcud XAI metodları isə öz növbəsində iki fundamental məhdudiyyətlə üzləşir: alqoritmik yanaşmalar semantik dərinlikdən məhrum olub, əlamətlər səviyyəsində onların məna interpretasiyası olmadan izahlar təqdim edir, klassik ontoloji yanaşmalar isə real dünyanın qeyri-müəyyənliyini adekvat modelləşdirməyə qadir deyil. Bu, ontologiyaların semantik gücünü və qeyri-səlis məntiqin riyazi vasitələrini birləşdirən, yeni nəsillik XAI sistemlərinin yaradılmasına yönəlmiş yeni metodların işlənilib hazırlanmasının aktuallığını şərtləndirir.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Tədqiqatın obyektı Sİ sistemlərinin, daha dəqiq desək, «qara qutu» modellərinin qəbul etdiyi qərarlar üçün izahların generasiyası prosesləri, modelləri və metodlarıdır. Tədqiqatın əsasında semantik texnologiyalar və qeyri-səlis məntiqin inteqrasiyası əsasında XAI qurulması metodologiyasının işlənməsi və tətbiqi məsələləri dayanır. Tədqiqatın

predmetinə ontologiyada təqdim olunan semantik xüsusiyyətlər, Fuzzy OWL2 əsasında qeyri-səlis biliklərin formallaşdırılması metodları, habelə inam dərəcələri ilə izahların generasiyası və onların qiymətləndirilməsi üçün alqoritmlər və arxitektura daxildir.

İşin məqsədi və vəzifələri. İşin məqsədi mövcud XAI yanaşmalarının kompleks təhlili, həmçinin semantik texnologiyalar və qeyri-səlis məntiqin inteqrasiyasına əsaslanan yeni XAI qurulması yanaşmalarının işlənməsi və tədqiqidir; məqsəd «qara qutu» modellərinin izahlarının etibarlılığını, dərinliyini və anlaşılıqlığını artırmaq üçün onların praktiki tətbiq oluna bilməsini təmin etməkdir. Göstərilən məqsədə nail olmaq aşağıdakı əsas vəzifələrin yerinə yetirilməsini nəzərdə tutur:

- Yeni metodların işlənilib hazırlanması zərurətini şərtləndirən əsas məhdudiyyətləri müəyyən etmək məqsədilə İzah Oluna Bilən Süni İntellekt sahəsində mövcud yanaşmaların təhlili;
- Ekspert biliklərinin universal ontoloji təqdimatı üçün "izahedici" xüsusiyyətlər konsepsiyasının işlənilib hazırlanması;
- Qeyri-dəqiq biliklərin modelləşdirilməsi və əminlik dərəcələri ilə izahatların generasiyası üçün qeyri-səlis ontologiyalara əsaslanan “qeyri-səlis izah oluna bilən” metodunun işlənilib hazırlanması;
- Maşın öyrənməsi modellərinin qeyri-səlis ontologiya ilə inteqrasiyası məqsədilə izah oluna bilən sistemin çevik arxitekturasının yaradılması;
- Verilənlərin xüsusiyyətlərinin ontologiyada təqdim edilməsi üçün qeyri-səlis klasterləşdirmə nəticələrinin emalı prosedurunun işlənilib hazırlanması;
- Təklif olunan yanaşmaların müxtəlifcinsli verilənlər yığınları üzərində aprobeşiyası və qiymətləndirilməsi üçün bir sıra hesablama eksperimentlərinin aparılması.

Tədqiqat metodları. Qarşıya qoyulmuş vəzifələr qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsi, biliklərin mühəndisliyi metodları, ontologiyaların və semantik şəbəkələrin modelləşdirilməsi, maşın və dərin öyrənmə, klaster analizi, kompüter modelləşdirilməsi metodları, riyazi hesablama eksperimentləri, həmçinin ekspert

qiymətləndirilməsi və müqayisəli təhlil metodlarının tətbiqi ilə həll edilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar. Müdafiəyə dissertasiya işinin aşağıdakı əsas müddəaları və nəticələri çıxarılır:

- Müxtəlif verilən növləri üçün tətbiq oluna bilməni təmin edən ekspert biliklərinin ontoloji formallaşdırılmasının yeni üsulunu təqdim edən «izahedici» xüsusiyyətlər konsepsiyası;
- Fuzzy OWL2 qeyri-səlis ontologiyalarının köməyi ilə real verilənlərin və biliklərin qeyri-müəyyənliyini və bulanıqlığını modelləşdirməyə, həmçinin kəmiyyət inam dərəcələri ilə izahlar yaratmağa imkan verən «qeyri-səlis izah oluna bilmə» metodologiyası;
- Mövcud istənilən “qara qutu” modellərinə onların proqnostik dəqiqliyi və interpretasiya oluna bilməsi arasında kompromis olmadan semantik-qeyri-səlis izah tətbiq etməyə imkan verən çevik metod və izah oluna bilən sistem arxitekturası;
- Funksional yönümlü, insan yönümlü və hibrid yanaşmaları əhatə edən, yaradılan qeyri-səlis semantik izahların keyfiyyətinin kompleks qiymətləndirilməsi metodologiyası.

Elmi yenilik. Bu dissertasiya işinin elmi yeniliyinin əsas mahiyyəti aşağıdakılardan ibarətdir:

- İlk dəfə olaraq izah oluna bilən süni intellektdə ekspert biliklərinin ontoloji təsviri üçün abstrakt “izahedici” xüsusiyyətlər yaradılmışdır;
- İlk dəfə olaraq OWL2 qeyri-səlis ontologiyası üçün yeni yaradılmış “izahedici” xüsusiyyətlərdən istifadə edilməklə qeyri-dəqiq biliklər mühitində izahatlar işlənilib hazırlanmışdır;
- İlk dəfə olaraq qeyri-səlis biliklər vasitəsilə təqdim olunan müxtəlif növlü verilənlər əsasında “qara qutu” nəticələrinin izahı üçün metod işlənilib hazırlanmışdır;
- Verilənlərin xüsusiyyətlərinin ontologiyada təqdimatı üçün qeyri-səlis klasterləşdirmənin nəticələri emal edilmişdir;
- Təklif olunan yanaşmalar əsasında kompüter simulyasiyasının işlənilib hazırlanması, əldə edilmiş orijinal nəticələrin təhlili və qiymətləndirilməsi aparılmışdır.

Elmi-praktik əhəmiyyət. Dissertasiya işində əldə olunan nəticələr həm nəzəri, həm də praktiki əhəmiyyətə malikdir. İşdə qeyri-səlis yanaşmadan istifadə qeyri-müəyyənliliyi nəzərə alaraq imkan verir. Dissertasiya işində yüksək məhsuldarlıqlı “qara qutu” modelləri üçün izah modullarının sintezinə imkan verən, izah oluna bilən süni intellekt sistemlərinin yaradılması üzrə kompleks metodologiya təqdim edilmişdir. Bu metodikanın üstünlüyü onun çevikliyindən və universallığından; semantik cəhətdən zəngin və intuitiv anlaşılan izahatlar generasiya etmək qabiliyyətindən; qeyri-müəyyənliliyi adekvat Şəkil də modelləşdirmək imkanından; həmçinin süni intellekt sistemlərinə etimadın artırılmasından və insan-maşın birgə qərar qəbul etmə keyfiyyətinin yüksəldilməsindən ibarətdir. Təqdim olunan metodika müxtəlif predmet sahələrinə (maliyyə, tibb, materialşünaslıq, kibertəhlükəsizlik, kompüter görünüşü və sosial analitika) aid verilənlər yığını üzərində sınaqdan keçirilmişdir. Metodikanın əksər komponentləri üçün onun praktiki reallaşdırılma imkanını nümayiş etdirən program prototipi işlənib hazırlanmışdır.

İşin aprotasiyası. İşin əsas müddələri aşağıdakı konfrans və seminarlarda məruzə edilmişdir:

- First Research Workshop of the Computer Science Research Department PhD candidates. UFAZ, 2024;
- Ümummilli Lider Heydər Əliyevin 101 illiyinə həsr olunmuş Respublika Elmi Konfransı. ADNSU, 2024;
- 28th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES-2024). Seville, Spain, 2024;
- The 2024 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA). Manama, Bahrain, 2024;
- X Beynəlxalq Elmi Konfrans «Qərarların Qəbuluna İntellektual Dəstəyin İnformasiya Texnologiyaları» (ITIDS’2024). Ufa, Rusiya, 2024;
- Gənc Tədqiqatçıların və Doktorantların “Elm Günü”-nə həsr olunmuş Böyük Elmi Seminarı. ADNSU, 2025;
- Second Research Workshop of the Computer Science Research Department PhD candidates. UFAZ, 2025;

- Ümummilli Lider Heydər Əliyevin 102 illiyinə həsr olunmuş Respublika Elmi Konfransı. ADNSU, 2025.

Nəşrlər. Dissertasiya mövzusu üzrə 10 elmi iş dərc edilmişdir (onlardan 4-ü həmmüəllifsizdir), bunların 6-sı məqalə, 4-ü isə tezisdir. 5 iş beynəlxalq bazalarda indekslənilir. 1 məqalə Scopus verilənlər bazasına daxildir (Q2 kateqoriyası), 1 tezis isə Web of Science və Scopus-da indekslənen beynəlxalq konfransın materiallarında dərc olunmuşdur. Digər beynəlxalq nəşrlərə, o cümlədən, Rusiya Federasiyasının Ali Attestasiya Komissiyası tərəfindən tövsiyə olunan jurnalda 1 məqalə (K2 kateqoriyası), Özbəkistan Respublikasının Ali Attestasiya Komissiyası tərəfindən tövsiyə olunan jurnalda 1 məqalə və RİNS bazasında indekslənen beynəlxalq konfrans materiallarında 1 tezis daxildir.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı.

Dissertasiya işi Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin «Kompüter mühəndisliyi» kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

İşin strukturu və həcmi. İşin əsas hissəsi 160 səhifədə təqdim olunmuş və girişdən, 5 fəsildən, nəticədən, istifadə olunmuş ədəbiyyat siyahısından və qısaltmalar siyahısından ibarətdir. Həmçinin 27 şəkil dən, 10 cədvəldən və ədəbiyyat siyahısında 150 mənbə elementdən ibarətdir. Şəkillər, cədvəllər, qrafiklər, əlavələr, bibliografiya və mətndəki boşluqlar nəzərə alınmadan işin həcmi təxminən belədir: Giriş – 8 000 işarə, I fəsil – 25 000 işarə, II fəsil – 45 000 işarə, III fəsil – 40 000 işarə, IV fəsil – 40 000 işarə, V fəsil – 40 000 işarə və Nəticə – 2 500 işarə. Ümumilikdə dissertasiyanın ümumi həcmi təxminən 200 000 işarə təşkil edir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə tədqiqat mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış, dissertasiya işinin obyektı, predmeti, məqsədi və vəzifələri formalaşdırılmış, tədqiqat metodları, müdafiəyə çıxarılan müddəalar, elmi yenilik və əldə olunmuş nəticələrin elmi-praktik əhəmiyyəti müəyyən edilmişdir. Bundan əlavə, işin aprobeasiyası, tədqiqat mövzusu üzrə nəşrlər, həmçinin dissertasiyanın strukturu və həcmi haqqında məlumat verilmişdir.

Birinci fəsildə İzah Oluna Bilən Süni İntellekt metodologiyalarının (ing. eXplainable Artificial Intelligence, XAI) müasir vəziyyətinin təhlili aparılmış, tədqiqatın zəruriliyi və aktuallığı əsaslandırılmışdır. Həmçinin dissertasiya işinin elmi məsələsi qoyulmuşdur.

Fəsildə göstərilmişdir ki, XAI çərçivəsində *izah* modelin qərarı haqqında istifadəçiyə bu qərarı anlaşılan və yoxlanıla bilən edən amillər və asılılıqlarla birlikdə məlumat təqdim edilməsi kimi nəzərdən keçirilməlidir.

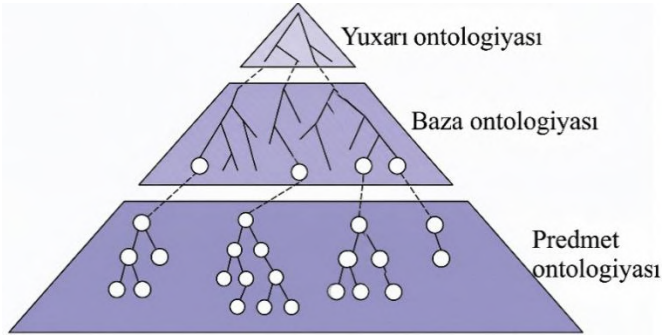
Yuxarıda deyilənlərə əsaslanaraq mövcud yanaşmaların əsas məhdudiyyətləri müəyyən edilmişdir: domen biliklərinin yetərinə nəzərə alınmaması, əlamətlərin zəif semantik interpretasiyası və izahların istifadəçinin koqnitiv xüsusiyyətlərinə kifayət qədər uyğunlaşdırılmaması.

Fəsildə aparılmış təhlilin nəticələrinə görə *dissertasiya işinin əsas elmi vəzifəsi* – semantik texnologiya və qeyri-səlis məntiqə əsaslanan, maşın öyrənməsi (MÖ) üzrə “qara qutu” modelləri üçün formalaşdırılan izahların semantik zənginliyini, etibarlılığını və interpretasiya oluna bilməsini artırmağı, habelə qeyri-səlis və natamam biliklərlə işləmək imkanını təmin etməyi hədəfləyən yeni XAI sistemləri qurulması metodologiyasının işlənməsi və tədqiqidir.

İkinci fəsildə təklif olunan yanaşmanın formal əsası kimi semantik texnologiyaların və qeyri-səlis məntiqin istifadəsi əsaslandırılmışdır. Əsas anlayış və yanaşmalar təsvir edilmiş, həmçinin qeyri-səlis məntiqin, qeyri-səlis məntiqi çıxarış sisteminin və Fuzzy OWL2 qeyri-səlis ontologiyasının müxtəlif aspektləri təhlil olunmuşdur.

Semantik veb World Wide Web Consortium (W3C) standartlarının məcmusu kimi nəzərdən keçirilir; bu standartlar mahiyyətlərin identifikasiyasını, biliklərin təqdimini və onlara sorğuların icrasını təmin edir. Baza komponentləri kimi resursların unikal identifikasiyası üçün URI, biliklərin «subyekt-predikat-obyekt» triplet forması ilə təqdimatı üçün RDF, RDF verilənlərinə sorğular üçün SPARQL və anlayışlar lüğətinin və onların semantik əlaqələrinin verilməsi vasitəsi kimi ontologiyalar istifadə olunur.

İnformatikada ontologiya biliyin strukturlaşdırılmış və formal təqdimatı vasitəsi kimi istifadə olunur. O, iyerarxik quruluşa malikdir (Şəkil 1-də göstərilmişdir) və yuxarı, baza və predmet ontologiyası səviyyələrində nəzərdən keçirilə bilər¹.



Şəkil 1. İnformatikada ontologiyanın üç əsas səviyyəsi¹

Formal olaraq ontologiya konseptlər çoxluğunu, xüsusiyyətlər çoxluğunu və predmet sahəsinin münasibət və məhdudiyyətlərini fiksasiya edən aksiomlar sistemini ehtiva edən kortejlə verilir². Bu $O = (C, \leq_C, R, \leq_R, A^O)$ düsturu ilə ifadə olunur, burada O ontologiya qismən sıralanmış \leq_C konseptləri C , qismən sıralanmış \leq_R xüsusiyyətləri R və A^O aksiomlarını özündə birləşdirir.

XAI-də **ontologiyalardan istifadənin relevantliyi təsvir edilmiş** və müəyyən olunmuşdur ki, ontologiya maşın öyrənməsinin nəticələrini predmet sahəsinin formal müəyyən edilmiş konseptləri və münasibətləri ilə əlaqələndirməyə, simvolik bilikləri verilənlərlə inteqrasiya etməyə və insan üçün anlaşılan izahlar formalaşdırmağa imkan verir.

¹ Navigli, R., Velardi, P., Gangemi, A. Ontology learning and its application to automated terminology translation // IEEE Intelligent Systems, – 2003. vol. 18, № 1, – p. 22-31.

² Maedche, A., Staab, S. Measuring Similarity between Ontologies // Proceedings of the 13 International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management, – Siguenza: – 1-4 October, – 2002, – p. 251-263.

Müasir ontologiyaların riyazi əsasını predmet sahəsinin ciddi, eyni zamanda interpretasiya oluna bilən təsvirini təmin edən Deskriptiv Məntiqlər (ing. Descriptive Logic, DL) təşkil edir. Təsviri məntiqlər əsasında qurulmuş ontologiya *TBox*-u – konseptlər və onların qarşılıqlı əlaqələri haqqında aksiomları (məsələn, daxilolma $C1 \sqsubseteq C2$, burada $C1$ – altkonseptidir $C2$; ekvivalentlik $C1 \equiv C2$), *ABox*-u – fərdlər, onların konseptlərə mənsubiyyəti (məsələn, $a: C$) və rollar vasitəsilə aralarındakı əlaqələr haqqında müddəaları, *RBox*-u isə – rollar və onların xarakteristikaları (məsələn, $R1 \sqsubseteq R2$ iyerarxiyası, tranzitivlik) haqqında aksiomları əhatə edir.

Məsələn, DL-də ALUEC dili AL baza dilinin birləşmə (U), tam ekzistensial kvantifikasiya (E) və ixtiyari konseptlərin inkarı (C) əməliyyatları ilə genişləndirilmiş variantıdır. Daha mürəkkəb məntiqlərin adları da eyni prinsip üzrə formalaşır. Məsələn, SHOIN – rolların iyerarxiyası (H), nominalar (O), əks rollar (I) və kəmiyyət məhdudiyyətləri (N) ilə genişləndirilmiş S məntiqidir ($ALC +$ tranzitivlik). Bu, cədvəl 1-də daha ətraflı nəzərdən keçirilmişdir³.

Cədvəl 1
Bəzi müxtəlif DL-lərin növləri³

İşarələmə	Mənası
<i>ALC</i>	İxtiyari konseptlərin tamamlanması (inkarı) olan atributiv dil.
<i>S</i>	Rollar üçün tranzitivlik aksiomları.
<i>E</i>	Tam ekzistensial kvantifikasiya ($\exists R. C$).
<i>U</i>	Konseptlərin birləşməsi (\sqcup).
<i>H</i>	Rolların iyerarxiyası (sub-rollar).
<i>R</i>	Rollar üçün əlavə aksiomlar (refleksivlik, irrefleksivlik və disyunktluq).
<i>O</i>	Nominalar (bir fərddən ibarət konseptlər).
<i>N</i>	Kardinallıq üzrə kəmiyyət məhdudiyyətləri (kvalifikasiyasız).
<i>Q</i>	Kvalifikasiya olunmuş kardinallıq kəmiyyət məhdudiyyətləri.
<i>I</i>	Əks rollar ($R -$).
<i>F</i>	Rollar üçün funksional xüsusiyyətlər.

³ Rudolph, S. Foundations of Description Logics // Lecture Notes in Computer Science, – 2011. vol. 6848, – p. 76-136.

Bu məntiqlərin mühüm xüsusiyyəti *açıq dünya fərziyyəsidir* (ing. *Open World Assumption, OWA*)³; bu halda məlumatın olmaması müddəaların yanlışlığı kimi deyil, biliklərin natamamlığı kimi qiymətləndirilir.

Bu baxımdan OWL2 dili⁴ ontoloji təqdimatın baza vasitəsi kimi nəzərdən keçirilir.

OWL 2 DL standartlar arasında ən ifadəli olanıdır və SROIQ(D) məntiqinə əsaslanır.

Bu məntiq SHOIN(D)-ni rollar üçün mürəkkəb aksiomlarla (R) və kvalifikasiya olunmuş kəmiyyət məhdudiyyətləri ilə (Q) genişləndirir.

Fuzzy OWL2⁵ qeyri-səlis konseptləri, rolları və aksiomları təsvir etmək üçün qeyri-səlis genişlənmədir. Fuzzy OWL2 aşağıdakı xüsusiyyətlərə malikdir⁴:

- *Qeyri-səlis konseptlər* – fərdin qeyri-səlis sinfə dərəcə vasitəsilə mənsubiyyəti;
- *Qeyri-səlis rollar* – fərdlər arasında və ya fərdlərlə verilənlər dəyərləri arasında mənsubiyyət;
- *Qeyri-səlis verilənlər tipləri* – standart verilənlər tipləri üzərində qeyri-səlis çoxluqları müəyyən edir;
- *Qeyri-səlis modifikatorlar* – linqvistik modifikatorları tətbiq edir;
- *Qeyri-səlis aksiomlar* – standart OWL2 aksiomlarını genişləndirərək onlara həqiqət dərəcəsi verməyə imkan yaradır:
 - *Mənsubiyyət barədə qeyri-səlis müddəalar.*
 - *Rollar haqqında qeyri-səlis müddəalar.*
 - *Daxiletmə barədə qeyri-səlis aksiomlar.*
 - *Digər qeyri-səlis aksiomlar* – siniflərin ekvivalentliyi, disyunktluğu və s. üçün genişlənmələr.

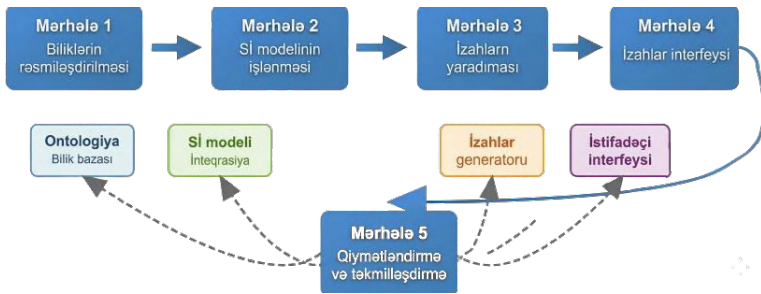
⁴ W3C. OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition): [Electronic resource] / World Wide Web Consortium. – 2012. URL: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview>

⁵ Bobillo, F., Straccia, U. An OWL Ontology for Fuzzy OWL 2 // Lecture Notes in Computer Science, – 2009. vol. 5722, – p. 151-160.

Fuzzy OWL2-nin XAI sistemlərinə inteqrasiyası daha çevik, semantik baxımdan zəngin və etibarlı izahların yaradılması üçün əhəmiyyətli imkanlar açır^{6,7}.

Üçüncü fəsildə XAI sistemlərinin izah oluna bilməsini artırmağa yönəlmiş yeni semantik xüsusiyyətlərin modelləşdirilməsi metodikası təklif edilmişdir. Əsas element kimi yalnız verilənlərin müşahidə olunan xarakteristikaları əsasında deyil, həm də məntiqi çıxarış, ekspert bilikləri, istifadəçi mental modelləri (MM) və obyektlər arasındakı oxşarlıqlar əsasında formalaşan «izahedici» xüsusiyyətlər təklif olunmuşdur.

Ontologiya yönümlü XAI sisteminin qurulmasının ümumi sxemi Şəkil 2-də təqdim edilmişdir. O, ekspert bilikləri və ilkin verilənlərdən semantik baxımdan interpretasiya edilə bilən izahın formalaşmasına keçid ardıcılığını əks etdirir.



Şəkil 2. Ontologiyalar əsasında XAI yaradılmasının sxemi

Müəyyən edilmişdir ki, səmərəli XAI izahının yaradılması, əgər o, istifadəçinin koqnitiv strukturlarında əks-səda doğurmursa, faydasızdır; burada əsas yeri *mental modellər (MM)* tutur. Təklif

⁶ Косов, П.И. Разработка Нечёткой Онтологии для Объяснимого Искусственного Интеллекта для Принятия Решений в Нечёткой Среде // – Tashkent: Chemical Technology, Control and Management, – 2025. № 2, –p. 19-26.

⁷ Косов, П.И., Гардашова, Л.А. Повышение достоверности объяснимого искусственного интеллекта посредством нечеткой логики и онтологии // – Воронеж: Моделирование, Оптимизация и Информационные Технологии, – 2025. т. 13, № 2(49), – с. 1-11.

olunan yanaşmada mental modellər zəruri komponent kimi nəzərdən keçirilir: istifadəçi modeli izahın forma və məzmununa tələbləri müəyyən edir, ekspert modeli isə ontologiyaya daxil edilən konseptlərin, əlamətlərin və əlaqələrin mənbəyi kimi çıxış edir.

Paylanmış MM-lər koordinasiyanı və kommunikasiyanı yaxşılaşdırır, bir-birinin hərəkətlərini proqnozlaşdırmağa, dəyişikliklərə daha tez uyğunlaşmağa və daha səmərəli birgə qərarlar qəbul etməyə imkan verir⁸. Riyazi olaraq bunu komanda üzvlərinin MM-lərini təmsil edən çoxluqların boş olmayan kəsişməsi kimi göstərmək olar: $M_A \cap M_B \cap M_C \neq \emptyset$ burada M_A , M_B , M_C ayrı-ayrı şəxslərin MM-ləridir. Əgər belə ümumi kəsişmə, məsələn, $M_A \cap M_B \cap M_C = \emptyset$ halında, yoxdursa, komanda tam bölüşdürülən modelə malik deyil.

Bu əsasda predmet sahəsinin təhlilini, ekspert biliklərinin cəlb edilməsini, istifadəçinin hazırlıq səviyyəsinin nəzərə alınmasını, verilənlərin və tapşırığın kontekstinin təhlilini, həmçinin onların interpretasiya faydalılığının qiymətləndirilməsi nəticələrinə görə xüsusiyyətlər toplusunun iterativ korreksiyasını ehtiva edən «izahedici» xüsusiyyətlərin seçimi proseduru təklif edilmişdir.

Təklif olunan “*izahedici*” *xüsusiyyətlər konsepsiyası*^{9,10} semantik cəhətdən zənginləşdirilmiş XAI inkişafının həddlərini genişləndirən semantik atributları ifadə edir. Bu xüsusiyyətlər müşahidə olunan xarakteristikaların sadə təsvirindən kənara çıxan və aşağıdakılar əsasında qurulan semantik atributlardır:

- Verilənlər və onların qarşılıqlı əlaqələri barədə məntiqi çıxarışlar;

⁸ Burtscher, M.J., Manser, T. Team mental models and their potential to improve teamwork and safety: A review and implications for future research in healthcare // Safety Science, – 2012. vol. 50, № 5, – p. 1344-1354.

⁹ Kosov, P. Advancing XAI: new properties to broaden semantic-based explanations of black-box learning models / P. Kosov, N. El Kadhi, C. Zanni- Merk, L. Gardashova // Procedia Computer Science, – 2024. vol. 246, – p. 2292-2301.

¹⁰ Kosov, P., El Kadhi, N., Zanni-Merk, C., Gardashova, L. Semantic-Based XAI: Leveraging Ontology Properties to Enhance Explainability // Proceedings of the 2024 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications, – Manama: – 11-12 December, – 2024, – p. 1-5.

- Müəyyən predmet sahəsində ekspert bilikləri;
- İstifadəçilərin ekspertlik səviyyəsini və informasiyanı qavrama üsulunu nəzərə alan MM-ləri;
- Obyektlər və ya verilən nümunələri arasında aşkar edilmiş oxşarlıqlar və analogiyalar.

«İzahedici» xüsusiyyətlərin əsas məqsədi MÖ modellərinin qəbul etdiyi qərarların daha dərin və intuitiv anlaşılan əsaslandırılmasını təmin etməkdir; bu, müxtəlif verilən növlərinin yalnız açıq deyil, həm də gizli, çıxarılmış və ya kontekstual aspektlərinin nəzərə alınması yolu ilə həyata keçirilir.

“İzahedici” xüsusiyyətlərin əsas xarakteristikaları və üstünlükləri:

- *Universallıq və çeviklik.* Heterogen verilənlər üçün vahid tipli izah mexanizmlərinin qurulması imkanı;
- *Ekspert bilikləri və MM-lərlə əsaslandırılma.* Ekspertlərin və müxtəlif hazırlıq səviyyəsinə malik istifadəçilərin verilənləri necə konseptuallaşdırdıqları və informasiyanı necə interpretasiya etdikləri nəzərə alınmaqla formalaşdırılır; bu da yaradılan izahların relevantlığını və anlaşılqlığını artırır;
- *Kontekstlilik və subyektivlik.* Universal, lakin potensial olaraq daha az relevantlı həllə can atmaq əvəzinə daha fərdiləşdirilmiş və uyğunlaşdırılmış izahlar yaradılır;
- *Dərin və məzmunlu izahlar üçün əsas.* Sİ modellərinin qərarlarına dair daha tam, dəqiq və məzmunlu izahlar formalaşdırmağa imkan verir.

«İzahedici» xüsusiyyətlər $P_{\text{exp}} \subseteq R$ çoxluğu kimi müəyyən edilmişdir, burada R əlaqələr çoxluğudur və hər bir $p \in P_{\text{exp}}$ xüsusiyyəti konkret d_i halının izahına $\mu_p(d_i) \in [0,1]$ qeyri-səlis mənsubiyyət dərəcəsi ilə töhfə verə bilər. Bu xüsusiyyətlər təklif olunan struktur çərçivəsində izahların qurulması üçün semantik bloklar rolunu oynayır. Belə xüsusiyyətlər bir neçə meyara cavab verməlidir:

- Həm ekspertlər, həm də qeyri-mütəxəssislər üçün əlçatanlıq;
- Birmənalı olmayan və ya qeyri-müəyyən verilənlərin təqdim olunması imkanı;

- OWA şəraitində ontoloji çıxarışla uyğunluq;
- Sadəlik və interpretasiya oluna bilmə.

Ontoloji təqdimatın əsas aspekti hər bir «izahedici» xüsusiyyət üçün sahələrin (Domain) və diapazonların (Range) aydın müəyyən edilməsidir. Məsələn, `hasWeatherType` xüsusiyyəti üçün domen `Clothes` (Geyim) sinfi, diapazon isə `WeatherType` (Hava tipi) sinfi ola bilər. Xüsusiyyətlərə həm pozitiv, həm də neqativ məhdudiyətlərin tətbiqi (məsələn, `Sandal that Not hasWeatherType some Cold`) ontologiyada daha dəqiq və detallı semantik təsvirlər yaratmağa imkan verir.

Xüsusiyyət seçimi proseduru – mənalı izahların generasiyası məqsədlə verilənlərdə ən uyğun semantik atributların identifikasiyası üçün prinsip və mərhələlərə əsaslanan metodoloji yanaşmadır:

- Predmet sahəsinin dərin təhlili və ekspert biliklərinin cəlb edilməsi;
- İstifadəçiyə yönümlülük və MM-lərin nəzərə alınması;
- Verilənlərin və tapşırığın kontekstinin təhlili;
- İzah oluna bilmənin yaxşılaşdırılmasına məqsədli yönəlmə;
- Prosesin iterativliyi və adaptivliyi;
- Ontoloji modelləşdirmə imkanlarının nəzərə alınması;
- Subyektivlik və kontekstliliyin qəbul edilməsi.

Daha sonra fəsildə paylanmış MM-lər vasitəsilə **qeyri-səlis izah oluna bilmənin** əsası qoyulmuşdur. Tədqiqatımız belə nəticəyə gəlmişdir ki, MM-lər qeyri-səlis izah oluna bilmənin təqdimatına töhfə verir və aşağıdakı izahların generasiyasına yönəlir:

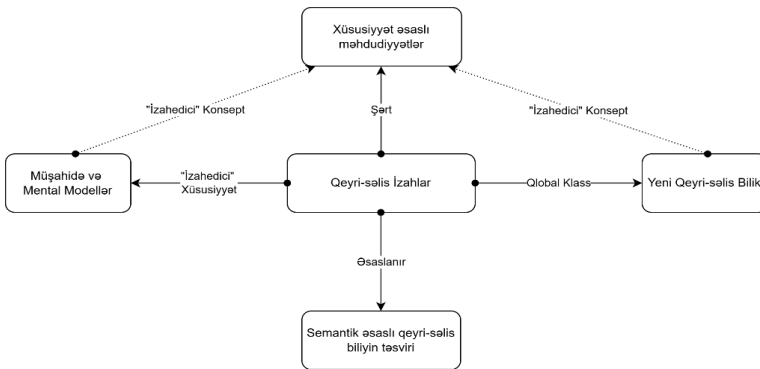
- *Koqnitiv təsəvvürlərə uyğun gəlir*: linqvistik dəyişənlərdən (“yüksək”, “aşağı”, “ehtimal ki”) və inam dərəcələrindən istifadə etməklə qeyri-səlis izahlar istifadəçinin mental modelindəki qeyri-səlis konseptlərə birbaşa proyeksiya oluna bilər.
- *Real qeyri-müəyyənliyi əks etdirir*: verilənlərə və ya modelin işinə xas olan qeyri-müəyyənliyi gizlətmək və ya nəzərə almamaq əvəzinə, qeyri-səlis izahlar onu aşkar Şəkil də göstərir ki, bu da istifadəçiyə vəziyyətin daha adekvat mental modelini formalaşdırmağa imkan verir.

- *Qradiasiyalar təmin edir*: onlar bu və ya digər amilin təsir dərəcəsini göstərir ki, bu da istifadəçiyə səbəb-nəticə əlaqələrinin daha incə və detallı mental modelini qurmağa imkan verir.

Həmin fəsildə izahların keyfiyyətinin qiymətləndirilməsi yanaşmaları da nəzərdən keçirilmişdir. Əsaslandırılmışdır ki, izah oluna bilmənin təhlili kəmiyyət və keyfiyyət metrikalarının birləşməsinə əsaslanmalıdır: birincilər izahların uzlaşmasını, fərqləndirilə bilməsini və dayanıqlığını xarakterizə edir, ikincilər isə onların anlaşılıqlığını, dərinliyini, mənimsənilməsini və istifadəçi üçün rahatlığını.

Dördüncü fəsildə qeyri-səlis izah oluna bilmənin formal modeli işlənmiş və bu yanaşmanı reallaşdıran sistem arxitekturası təklif edilmişdir. Qeyri-səlis izah oluna bilmə XAI-sisteminin modelin qərarını predmet sahəsinin semantik konseptləri ilə əlaqələndirən və eyni zamanda bu əlaqələrə dair inam dərəcəsini əks etdirən izahlar generasiya etmək qabiliyyəti kimi müəyyən edilir.

Müvafiq arxitektura Şəkil 3-də təqdim olunmuşdur. Burada giriş komponentləri qismində müşahidələr, mental modellər və «izahedicilər» xüsusiyyətlər çıxış edir, mərkəzi element qeyri-səlis izah moduludur, çıxış isə yeni qeyri-səlis biliklərlə tamamlanmış interpretasiya edilə bilən qərardır.



Şəkil 3. Təklif olunan qeyri-səlis izahları ontologiya əsasında müəyyən edən sistem dizaynı

Məsələn, kredit riski *müşahidələr əsasında alınan və paylanmış MM-i* əks etdirən müxtəlif izah oluna bilən *xüsusiyyətlərə əsaslanaraq* bilər. Biliklərin semantik yönümlü *qeyri-səlis təqdimatında* kredit riski ontologiyası ShortDuration (qısa müddət), SmallCredit (kiçik kredit), LittleSaving (az yığım) və s. kimi konseptləri müəyyən edə və onları kredit riski konsepti ilə əlaqələndirə bilər. *Xüsusiyyətlərə əsaslanan məhdudiyətlər* (məsələn, hasDuration, hasCreditAmount, hasSavingAccount və s.) izahı qeyri-səlis şərtlər vasitəsilə dəqiqləşdirir. Verilənlər toplusu əsasında *yeni qeyri-səlis biliklər* çıxarılır və qlobal sinif müəyyən edilir. Sistem çıxarışı *qeyri-səlis izah* formalaşdırır; burada borc alan *GoodRisk (0.94)* xüsusiyyətinə malikdir və bu nəticə ShortDuration (0.67), SmallCredit (0.55), LittleSaving (0.54) xüsusiyyətləri ilə dəstəklənir.

«İzahedici» xüsusiyyətlərin fəzifikasiyasına ehtiyac ilkin verilənlərin qeyri-səlisliyi, ekspert biliklərinin qeyri-müəyyənliyi və modelin çıxarışına təsir edən amillərin qradual təqdimatına tələbatla şərtlənir. İkili yanaşmadan fərqli olaraq, belə formallaşdırma obyektin sinfə və ya xüsusiyyətə yalnız müəyyən dərəcədə malik olduğu situasiyaları təsvir etməyə imkan verir.

Qeyri-səlis izah oluna bilmənin məqsədi model proqnozlarını yalnız semantik konseptlərlə əlaqələndirməyən, həm də bu əlaqələrə dair inam dərəcəsini və onlara xas qeyri-müəyyənliyi əks etdirən izahlar yaratmaqdır. Bu, ikili cavabların qeyri-adekvat olduğu qeyri-səlis biliklər mühitlərində xüsusilə vacibdir.

Formal olaraq **qeyri-səlis izah oluna bilmə freymvorku** $FE = (M, O_f, P_{exp}, K_f)$ kimi müəyyən edilmişdir; burada M ümumi paylanmış MM-i, O_f qeyri-səlis ontologiyası, P_{exp} izahedici xüsusiyyətlər çoxluğunu, K_f isə verilənlər toplusundan çıxarılmış qeyri-səlis bilikləri ifadə edir. MM-lər istifadəçi və ekspert biliklərinin koqnitiv təsəvvürlərinə uyğunluq, biliklərin real qeyri-müəyyənliyinin əks olunması, amillərin qradiasiyası və təsirinin göstərilməsi baxımından qeyri-səlis izah oluna bilmənin təqdimatına töhfə verir.

Qərar və ya hadisə y üçün qeyri-səlis izah $E_f(y) = \{(x_i, \mu(x_i)) \mid x_i \in X, \mu(x_i) \in [0,1]\}$ kimi ifadə olunur; burada $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ izah edən amillər çoxluğudur, $\mu(x_i)$ isə x_i amilinin y

izahına töhfə dərəcəsini göstərir. Təklif olunan yanaşmanın praktik reallaşdırılması üçün Fuzzy OWL2-dən, qeyri-səlis «izahedici» xüsusiyyətlərdən, izahlar üçün qeyri-səlis aksiomlardan, əminlik dərəcələrinin çıxarılması mexanizmlərindən və istifadəçiyə izahların təqdim edilməsi prosedurlarından istifadəyə əsaslanan arxitektura formallaşdırılmışdır¹¹. Qeyri-səlis məntiqi çıxarış mexanizmi kimi Fuzzy OWL2 formatında ontologiyaların emalını və qeyri-səlis təsviri məntiqləri dəstəkləyən fuzzyDL nəzərdən keçirilir. fuzzyDL alqoritmi cədvəl-alqoritmi ilə optimallaşdırma məsələsinin həllinin kombinasiyasına əsaslanır. Cədvəl 2-də boş ABox ilə qeyri-səlis ALC-nin bəzi qaydaları göstərilmişdir¹².

Cədvəl 2

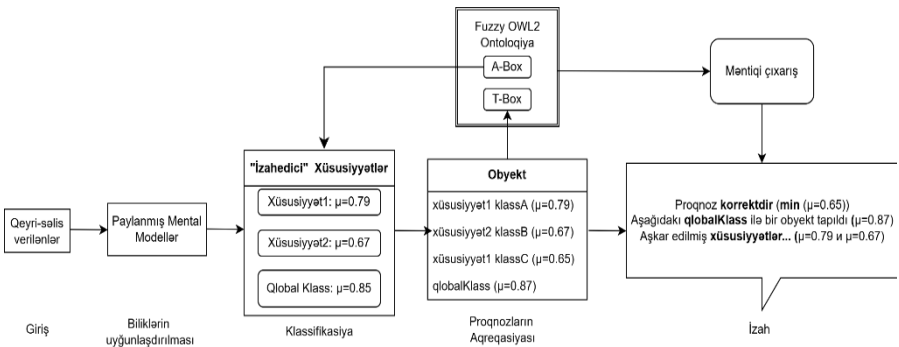
Boş ABox ilə qeyri-səlis ALC-nin məntiqi çıxarışı

Qayda	İlkin şərt	Əməl
(\perp)	$\perp \in \mathcal{L}(v)$	$C = C \cup \{x_{v:\perp} = 0\}$
(\top)	$\top \in \mathcal{L}(v)$	$C = C \cup \{x_{v:\top} = 1\}$
(\neg)	$\neg A \in \mathcal{L}(v)$	$C = C \cup \{x_{v:\neg C} = \ominus x_{v:C}\}$
(\sqcap)	$C_1 \sqcap C_2 \in \mathcal{L}(v)$	$\mathcal{L}(v) = \mathcal{L}(v) \cup \{C_1, C_2\}$ $C = C \cup \{x_{v:C} \otimes x_{v:D} = x_{v:C_1 \sqcap C_2}\}$
(\sqcup)	$C_1 \sqcup C_2 \in \mathcal{L}(v)$	$\mathcal{L}(v) = \mathcal{L}(v) \cup \{C_1, C_2\}$ $C = C \cup \{x_{v:C} \oplus x_{v:D} = x_{v:C_1 \sqcup C_2}\}$
(\exists)	$\exists R.C \in \mathcal{L}(v)$	Yeni w düyünün yaradılması $\mathcal{L}(\langle v, w \rangle) = \mathcal{L}(\langle v, w \rangle) \cup \{R\}$, \forall $\mathcal{L}(w) = \mathcal{L}(w) \cup \{C\}$, \forall $C = C \cup \{x_{\langle v, w \rangle:R} \otimes x_{w:C} = z, z \geq x_{v:\exists R.C}\}$
(\forall)	$\forall R.C \in \mathcal{L}(v)$ $R \in \mathcal{L}(\langle v, w \rangle)$	$\mathcal{L}(w) = \mathcal{L}(w) \cup \{C\}$ $C = C \cup \{x_{v:\forall R.C} \geq z, z = x_{\langle v, w \rangle:R} \Rightarrow x_{w:C}\}$

¹¹ Косов, П.И. Объяснимый Искусственный Интеллект: Исследование Нового Метода для Улучшения Объяснений на Основе Онтологий // Ümummillî Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 101-ci ildönümünə həsr olunmuş Doktorantların və Gənc Tədqiqatçıların Respublika Elmi Konfransının Materialları, – Bakı: – 6-7 may, – 2024, – s. 1-5.

¹² Bobillo, F., Straccia, U. Generalizing type-2 fuzzy ontologies and type-2 fuzzy description logics // International Journal of Approximate Reasoning, – 2017. vol. 87, – p. 40-66.

Arxitekturanın proqram reallaşdırılmasının əsas elementi «modeldən xüsusiyyətə» paradıqmasıdır. Bir monolit model əvəzinə qlobal klassifikatoru və hər biri «izahedici» xüsusiyyətlərdən birinin qiymətləndirilməsinə cavabdeh olan ayrıca klassifikatorlar toplusunu birləşdirən ansambl istifadə olunur. Bu, modellərin işinin nəticələrini biliklərin ontoloji təqdimatı ilə birbaşa əlaqələndirməyə imkan verir. Şəkil 4-də təklif olunan yeni arxitektura göstərilib. Belə sistem quruluşu yalnız modulluğu artırır, həm də qərarqəbuletmə prosesini daha şəffaf edir. İstənilən ayrıca modelin iş nəticələri yekun izah üçün ayrıca blok rolunu oynayır.



Şəkil 4. Yeni XAI sistemi üçün təklif olunan arxitektura

Yeni sistemin təklif olunan işləmə sxemi. Proqram kompleksı aydın müəyyən edilmiş prinsip üzrə işləyir və onu aşağıdakı addımlara bölmək olar:

Addım 1. Verilənlərin ilkin emalı: sistem girişdə obyekt haqqında məlumat alır (məsələn, cədvəldən bir sətir və ya təsvir). Verilənlər hazırlıq mərhələsindən keçir: cədvəlli verilənlər üçün bu, kateqorial əlamətlərin kodlaşdırılmasını, ədədi qiymətlərin ontologiyada təsvir olunan interval formatlarına gətirilməsi üçün normallaşdırılmasını və ya diskretləşdirilməsini əhatə edə bilər (məsələn, yaşın «Aşağı», «Orta», «Yüksək» qiymətləri). Həmçinin paylanmış mental modellərin inteqrasiyası baş verir.

Addım 2. Paralel klassifikasiya: hazırlanmış əlamətlər vektoru eyni zamanda qlobal klassifikatorun və bütün N xüsusiyyət

klassifikatorlarının girişinə verilir. Onların hər biri öz proqnozunu qaytarır (məqsəd sinfi və «izahedici» xüsusiyyətlərin hər biri üçün qiymətlər).

Addım 3. Ontologiyanın doldurulması: alınmış proqnozlar ontologiyanın ABox hissəsində nümunənin proqram vasitəsilə yaradılması üçün istifadə olunur. Məsələn, yeni pasiyent üçün Patient sinfinə aid fərd yaradılır və ona obyekt xüsusiyyətləri vasitəsilə xüsusiyyət-siniflərinin uyğun fərdləri ilə əlaqələr təyin edilir. Proses paylanmış mental modellərlə uzlaşma şəraitində gedir.

Addım 4. Qeyri-səlis biliklərin təqdimatı: bu mərhələdə qeyri-səlisliyin integrasiyası baş verir. MÖ modellərindən və ya qeyri-səlis klasterləşdirmə alqoritmi ilə hesablanmış mənsubiyyət dərəcələri ontologiyada yaradılmış müddəaların annotasiyası üçün istifadə olunur.

Addım 5. Məntiqi çıxarış və uzlaşmanın yoxlanılması: ontologiya konkret fərd haqqında məlumatlarla doldurulduqdan sonra məntiqi çıxarış işə salınır. O, əsas funksiyanı yerinə yetirir, yəni yeni müddəaların ontologiyada mövcud aksiom və məhdudiyətlərlə ziddiyyət təşkil edib-etmədiyini yoxlayır.

Addım 6. İzahın generasiyası: yekun mərhələdə sistem nəticələri aqreqasiya edir. Ontologiyadan yekun sinif, bütün «izahedici» xüsusiyyətlər və onların qeyri-səlis qiymətlər vasitəsilə inam dərəcələri çıxarılır. Bu informasiya strukturlaşdırılmış formata salınır və sonradan vizuallaşdırma üçün istənilən istifadəçi interfeysinə ötürülə bilər.

Beləliklə, işlənmiş proqram kompleksi çevik və miqyaslana bilən platforma kimi çıxış edir. O, natamam və qeyri-səlis biliklərlə işləyə bilən izah oluna bilən sistemlərin qurulması vəzifəsini səmərəli həll edir. Belə platforma «qara qutu» tipli model vasitəsilə alınmış klassifikasiya nəticələrini, eləcə də klasterləşdirmə tapşırıqlarını izah etməyə imkan verir. Bunu daha etibarlı və güvən doğuran XAI sistemlərinin yaradılması istiqamətində mühüm addım kimi nəzərdən keçirmək olar.

Beşinci fəsildə təklif olunan qeyri-səlis-semantik yanaşmanın eksperimental aprobeşiyası, verifikasiyası və qiymətləndirilməsinin nəticələri təqdim olunmuşdur.

Metodologiyanın verifikasiyası müxtəlif sahələrə aid 6 verilənlər toplusu üzərində aparılmışdır: Fashion MNIST (kompüter görməsi), Glass Identification (materialşünaslıq), German Credit Risk (kredit işi), Heart Failure Clinical Records (tibbdə proqnozlaşdırma), Network Traffic Data for Malicious Activity Detection (kompüter şəbəkəsində kibertəhlükəsizlik), Student Performance (tələbələrin akademik göstəriciləri). Belə seçim təklif olunan yanaşmanın heterogen verilən növlərinə və müxtəlif interpretasiya ssenarilərinə tətbiq oluna bilməsini qiymətləndirməyə imkan vermişdir.

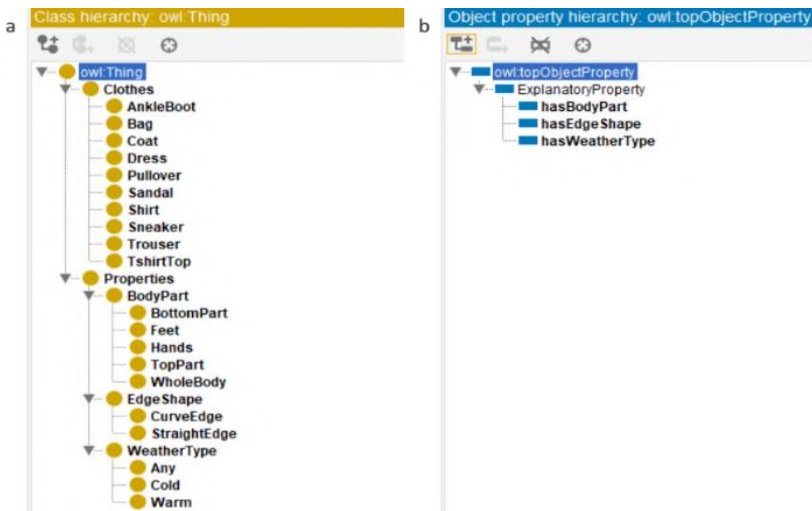
Eksperimental aprobasya üç mərhələdə aparılmışdır. Birinci mərhələdə klassik OWL2-ontologiyası mühitində «izahedici» xüsusiyyətlərin baza konsepsiyası verifikasiya edilmişdir. İkinci mərhələdə kəmiyyət qeyri-müəyyənlik təqdimatı ilə tamamlanan dəqiq ontologiyalı hibrid sxem tədqiq olunmuşdur. Üçüncü mərhələdə Fuzzy OWL2-yə tam keçid həyata keçirilmişdir ki, bu da modellərin çıxışlarını qeyri-səlis aksiomlar üçün mənsubiyyət dərəcələri kimi birbaşa interpretasiya etməyə imkan vermişdir. Üç mərhələnin nəticələrinin müqayisəsi göstərmişdir ki, məhz tam qeyri-səlis variant formalaşdırılan izahların ən yüksək ifadəliliyini, çevikliyini və məzmunluluğunu təmin edir.

Verifikasiyanın birinci mərhələsində «izahedici» xüsusiyyətlərin *baza konsepsiyası* yoxlanılmışdır. Bunun üçün OWL2 ontologiyası və standart məntiqi çıxarış mexanizmi istifadə olunmuşdur.

«Qara qutu» modeli verilənlər toplusunun klassifikasiyasını həyata keçirmişdir. Nəticədə klassik OWL2 ontologiyası və standart məntiqi çıxarış vasitəsilə klassifikatorun işinin izahı üçün «izahedici» xüsusiyyətlərin təqdim olunmasının prinsiplial mümkünlüyü təsdiq edilmişdir.

Lakin izah çox böyük həcmdə informasiya ilə yüklənmişdi və xüsusiyyətlərin həm sinfə mənsubiyyət, həm də sinfə qeyri-mənsubiyyət tərəfdən qiymətləri nəzərə alınmışdı. Bu sistemdə qeyri-səlis qiymətlər yox idi və məhz bu, belə yüklənməyə gətirib çıxarmışdır.

Şəkil 5-də eksperiment zamanı əldə olunmuş müvafiq ontologiyanın strukturuna nümunə verilmişdir⁹.



Şəkil 5. Fashion MNIST verilənləri üçün siniflər iyerarxiyası (a) və obyekt xüsusiyyətləri (b)

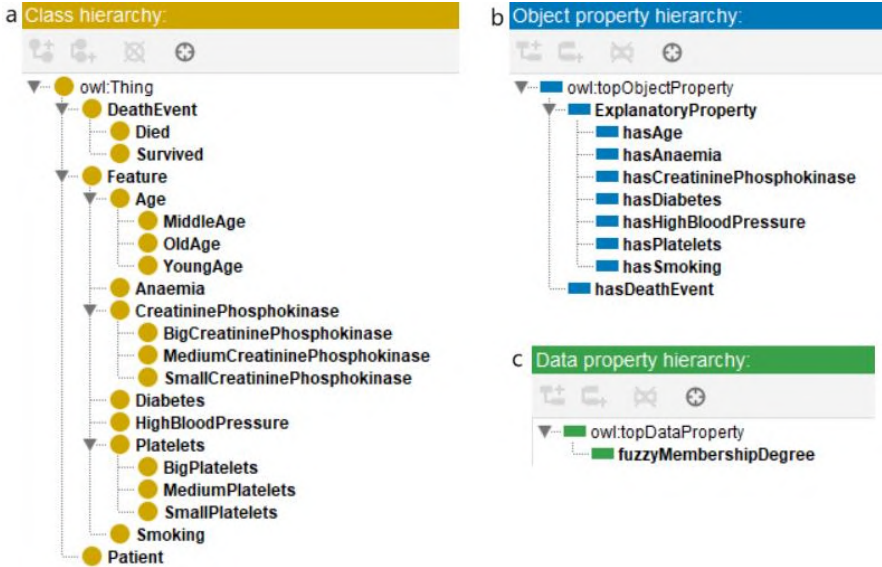
Aşağıda izah nümunəsi verilmişdir:

«*Image_0 TshirtTop sinfinə aiddir və ontologiyada korrektdir. BodyPart daxilində WholeBody-yə malik **deyil**, BodyPart daxilində TopPart-a malikdir, BodyPart daxilində BottomPart-a malik **deyil**, BodyPart daxilində Feet-ə malik **deyil**, BodyPart daxilində Hands-ə malik **deyil**, WeatherType daxilində Cold-a malik deyil, WeatherType daxilində Warm-a malikdir, WeatherType daxilində Any-yə malik **deyil**, EdgeShape daxilində StraightEdge-ə malik **deyil**, EdgeShape daxilində CurveEdge-ə malikdir.*»

Xüsusiyyətlərin çevikliyinə daha bir təsdiqi, şüşə növünün onun kimyəvi tərkibi əsasında klassifikasiya edilməsinin tələb olduğu “Glass Identification” verilənlər toplusu üzərində aparılmış eksperimentdir¹³. Burada “izahedici” xüsusiyyətlər rolunda məhz kimyəvi elementlərin özləri çıxış etdiyi ontologiya yaradılmışdır.

¹³ Qardaşova, L.A., İbrahimova, S.R., Kosov, P.İ. Şüşənin Kimyəvi Tərkibinə Əsaslanan İdentifikasiyasında İzah Oluna Bilən Süni İntellektin Tətbiqi // – Bakı: Elmi Məcmuə (Milli Aviasiya Akademiyası), – 2025. c. 26, № 4, – s. 91-99.

İkinci mərhələdə yanaşmanın *hibrid variantı* reallaşdırılmışdır; bu halda dəqiq OWL2 ontologiyası kəmiyyət qeyri-müəyyənlik təqdimatı ilə tamamlanmışdır. Mənsubiyyət dərəcəsinin saxlanması üçün formal baxımdan dəqiq struktur daxilində qeyri-səlis xarakteristikalar üçün konteyner rolunu oynayan xüsusi verilən xüsusiyyətindən istifadə olunmuşdur. Bu tip ontologiyaya nümunə Şəkil 6-da göstərilmişdir.



Şəkil 6. Ürək çatışmazlığı verilənlər toplusu üçün siniflər (a), obyekt xüsusiyyətləri (b) və verilənlər xüsusiyyətləri (c) iyerarxiyaları

Sübut olunmuşdur ki, dəqiq ontoloji struktura qeyri-müəyyənliyin kəmiyyət xarakteristikasının daxil edilməsi izah amillərinin təqdimat çevikliyini artırmağa imkan verir, baxmayaraq ki, model özü hələ tam qeyri-səlis semantikanı təmin etmir.

Məntiqi çıxarışa kömək üçün semantik veb qaydaları (ing. Semantic Web Rule Language, SWRL) da istifadə olunur. Tam izah oluna bilmə ona görə əldə edilir ki, qaydalar ontologiyada mövcud olan bütün «izahedici» xüsusiyyətləri özündə birləşdirir (Şəkil 7).

Patient(?p) \wedge
 hasAge(?p, OldAge) \wedge
 hasAnaemia(?p, true) \wedge
 hasCreatininePhosphokinase(?p, MediumCreatininePhosphokinase) \wedge
 hasDiabetes(?p, true) \wedge
 hasHighBloodPressure(?p, true) \wedge
 hasPlatelets(?p, SmallPlatelets) \wedge
 hasSmoking(?p, true)
 \rightarrow hasDeathEvent(?p, Died)

Patient(?p) \wedge
 hasAge(?p, MiddleAge) \wedge
 hasAnaemia(?p, false) \wedge
 hasCreatininePhosphokinase(?p, SmallCreatininePhosphokinase) \wedge
 hasDiabetes(?p, false) \wedge
 hasHighBloodPressure(?p, false) \wedge
 hasPlatelets(?p, MediumPlatelets) \wedge
 hasSmoking(?p, false)
 \rightarrow hasDeathEvent(?p, Survived)

Şəkil 7. Ürək çatışmazlığı verilənlər toplusu üçün ontologiyada məntiqi çıxarışa aid mümkün SWRL qaydaları⁷

Aşağıda izah nümunəsi verilmişdir:

«*Patient* sinfi üçün *Entry_0 Survived* sinfinə aiddir. O, ontologiyada **korrektdir**. İzahedici xüsusiyyətlər aşağıdakılardır: *hasAge* üçün *MiddleAge*, *hasAnaemia* üçün *false*, *hasCreatininePhosphokinase* üçün *SmallCreatininePhosphokinase*, *hasDiabetes* üçün *false*, *hasHighBloodPressure* üçün *false*, *hasPlatelets* üçün *MediumPlatelets*, *hasSmoking* üçün *false*. Məqsəd sinif *hasDeathEvent* üçün *survived-dir* və *fuzzyMembershipDegree* qeyri-səlis mənsubiyyət dərəcəsi 0.8-ə bərabərdir.»

Qeyri-səlis mənsubiyyət funksiyası sayəsində əsas məzmun saxlanılmaqla izahda daha az informasiya əldə etmək mümkün olmuşdur. Lakin «izahedici» xüsusiyyətlər üçün qeyri-səlis mənsubiyyətin olmaması qeyri-dəqiq biliklərin təqdim olunması problemini açıq saxlayır və izahları kifayət qədər aydın etmir.

Yekun mərhələ Fuzzy OWL2 bazasında **qeyri-səlis izah oluna bilməyə** tam keçidə uyğun gəlirdi. Eksperimental baza kimi linqvistik və qeyri-səlis interpretasiyanı təbii surətdə qəbul edən əlamətlərdən ibarət Student Performance verilənlər toplusundan istifadə olunmuşdur. Bu konfigurasiyada kəmiyyət atributları linqvistik dəyişənlər və qeyri-səlis terminlər vasitəsilə təqdim edilmiş, modellərin çıxışları isə birbaşa olaraq qeyri-səlis aksiomlar üçün mənsubiyyət dərəcələri kimi interpretasiya olunmuşdur¹⁰.

Sistemin proqram konfigurasiyası əsas dəyişikliklərə məruz qalmışdır:

- *Qeyri-səlis ontologiya (Fuzzy OWL2)* aşağıdakı fundamental qeyri-səlis konstruksiyaları tətbiq etməyə imkan vermişdir:
 - *Qeyri-səlis aksiomlar*: artıq ABox-dakı hər bir müddə müəyyən inam dərəcəsinə malikdir və bu dərəcə birbaşa MÖ modelinin çıxış qiymətinə uyğundur;
 - *Linqvistik dəyişənlər*: kəmiyyət atributları (məsələn, “hazırlıq vaxtı”) qeyri-səlis terminlərə malik linqvistik dəyişənlər kimi təqdim olunmuşdur (“qeyri-kafi”, “mülayim”, “əhəmiyyətli”). Bu terminlərin və onların mənsubiyyət funksiyalarının (məsələn, trapetsiya və ya üçbucaq formalı) müəyyən edilməsi prosesi pedaqogika sahəsində ekspert biliklərinə əsaslanmışdır ki, bu da modelə predmet sahəsinin insan tərəfindən başa düşülməsini daxil etməyə imkan vermişdir.
- *Arxitektura* : “modeldən xüsusiyyətə” prinsipi saxlanılmışdır, lakin indi modellərin çıxış nəticələri (məsələn, hasStudyTime xüsusiyyəti üçün 0.85 ehtimalı) birbaşa və üzvi Şəkil də qeyri-səlis aksiomlar üçün mənsubiyyət dərəcələri kimi interpretasiya olunur, bununla da MÖ çıxarışı ilə biliklərin semantik təqdimatı arasında inteqrasiya yaradılır. Müəyyən edilmişdir ki, Fuzzy OWL2-dən istifadə mənsubiyyət dərəcələrinin ən təbii və tam təqdimatını təmin edir; bunun sayəsində izahlar daha məzmunlu, qradiasiyalı və interpretasiya oluna bilən olur. «İzahedici» xüsusiyyət üçün qeyri-səlis aksiomlu nümunə Şəkil 8-də verilmişdir.

```

<owl:Axiom>
  <fuzzyLabel>
    <fuzzyOwl2 fuzzyType="axiom">
      <Degree value="0.79" />
    </fuzzyOwl2>
  </fuzzyLabel>
  <owl:annotatedSource rdf:resource="&fuzzy_student;Student_0"/>
  <owl:annotatedTarget rdf:resource="&fuzzy_student;HighGrades"/>
  <owl:annotatedProperty rdf:resource="&fuzzy_student;hasGrades"/>
</owl:Axiom>

```

Şəkil 8. Tələbə verilənləri nümunəsində Fuzzy OWL2 qeyri-səlis aksiomlu “izah oluna bilən” xüsusiyyət nümunəsi

Nəticələr göstərmişdir ki, tam qeyri-səlis variantda sistem daha məzmunlu və çevik izahlar formalaşdırır; bu izahlarda hər bir «izahedici» xüsusiyyət inam ölçüsü ilə müşayiət olunur. Bu, yalnız hansı amillərin qərara təsir etdiyini göstərməyə deyil, həm də onların yekun nəticənin formalaşmasında iştirak dərəcəsini əks etdirməyə imkan verir¹². Sistem çıxarışının nümunəsi:

«Tələbə (Student_0) GoodAcademicPerformance kimi klassifikasiya edilmişdir (inam dərəcəsi 0.88 olmaqla). Bu qərar aşağıdakı amillərə əsaslanır: HighStudyTime (0.85), HighGrades (0.79), GoodFamRel (0.67), LittleAbsences (0.62) və MediumGoOut (0.58)».

Bu nümunə yanaşmamızın əsas üstünlüklərini nümayiş etdirir; çünki sistem yalnız müsbət qərara təsir göstərən relevant xarakteristikaları ayırmır, həm də hər bir amilin töhfəsini kəmiyyətcə qiymətləndirir.

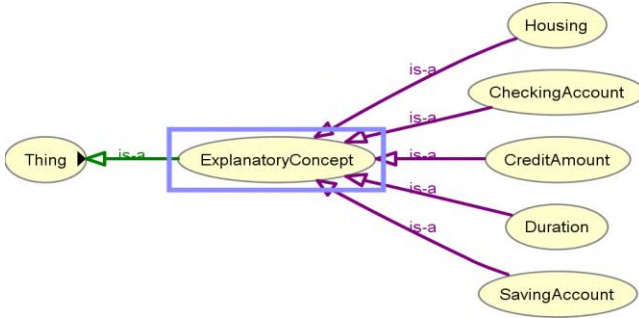
Fəsilə qeyd olunmuşdur ki, bizim sistemdə klassifikasiya dəqiqliyi mövcud həlləri üstələməsə də, tədqiqatın əsas məqsədi məhz proqnozların interpretasiya oluna bilməsinin artırılması olmuşdur. Bu baxımdan qeyri-səlis ontoloji strukturlar klassik yanaşmalarla müqayisədə əhəmiyyətli üstünlük göstərmişdir.

İşlənmiş qeyri-səlis və dəqiq yanaşmaların müqayisəli təhlili. İzahlardakı fərqi əyani göstərmək üçün German Credit Risk verilənlər toplusu əsasında «izahedici» xüsusiyyətlərə söykənən iki yanaşmanın müqayisəli təhlili aparılmışdır.

Dəqiq yanaşmada standart OWL2 ontologiyasından istifadə olunur. Hər bir «izahedici» xüsusiyyət (konsept) üçün ayrıca MÖ modeli öyrədilmişdir. Modellərin çıxış məlumatları (məsələn, LittleSaving proqnozlaşdırılan sinfi) ABox-a əlavə olunan mütləq, ikili müddəalara çevrilirdi (Şəkil 9).

Qeyri-səlis yanaşmada Fuzzy OWL2 qeyri-səlis ontologiyası tətbiq edilmişdir. Bu, SmallCredit (kiçik kredit) və ya LongDuration (uzun müddət) kimi anlayışları diskret kateqoriyalar kimi deyil, üzən mənsubiyyət dərəcələrinə malik linqvistik dəyişənlər kimi təqdim etməyə imkan vermişdir. İzahın formalaşdırılması prosesi bu qeyri-

səlis müddələrin və onların inam dərəcələrinin aqreqasiyasından ibarət olmuşdur.



Şəkil 9. Kredit riski verilənlər toplusu üçün “izah oluna bilən” konsept

Məntiqi çıxarışı dəstəkləmək üçün SWRL dilində 15 qayda işlənmişdir (9-u GoodRisk, 6-sı BadRisk üçün); bu qaydalar xüsusiyyət kombinasiyalarını yekun qərarla əlaqələndirirdi. Məsələn: «*LoanTaker(?x) ^ hasCheckingAccount(?x, NAChecking) ^ hasSavingAccount(?x, LittleSaving) -> hasRisk(?x, Bad)*».

Daha sonra işlənmiş **metodun digər yanaşmalarla qiymətləndirilməsi və müqayisəli təhlili aparılmışdır**. Əsas məqsəd təklif olunan izah metodlarının səmərəliliyinin və etibarlılığının verifikasiyasıdır.

Nəticələrin müqayisə oluna bilməsini təmin etmək üçün eyni başlanğıc şərtlər sabitləşdirilmişdir: nümunənin eyni elementi, modelin eyni proqnozu və xüsusiyyətlərin eyni məkanı. Bununla müşahidə obyektinin, amillər dəstinin və yekun proqnozun dəyişməsinin təsiri istisna edilmiş, müqayisə isə izahın qurulması mexanizmlərinin özləri arasındakı fərqlər müstəvisinə keçirilmişdir.

Kəmiyyət meyarları kimi Evklid məsafəsi, Jakkar əmsalı, çəkili qeyri-səlis orta, izahın uzlaşmasının Bayes ehtimalı, həmçinin Z-ədədlərə əsaslanan çəkili cəmlər modeli istifadə olunmuşdur. LIME, SHAP, kontrfaktual izahlar, qeyri-səlis qaydalara əsaslanan izahlar və

qeyri-səlis qərar ağaclarına əsaslanan izahlar bir-biri ilə müqayisə edilmişdir.

Bununla belə, etibarlı qiymətləndirmə üçün ekspert və istifadəçilərdən ibarət qrup da sorğuya cəlb edilmişdir ki, alınan izahlarda bütün informasiyanın əks olunub-olunmadığı müəyyən edilsin. Anlaşıqlıq, məmnunluq, etimad, effektivlik və icra oluna bilmə qiymətləndirilmişdir.

Əldə olunmuş nəticələr XAI sistemlərinin inkişaf istiqaməti kimi dəqiq semantik modeldən qeyri-səlis-ontoloji arxitekturaya keçidin məqsədüuyğunluğunu təsdiqləyir. Təklif olunan yanaşma daha dərin, kontekstlə zəngin və koqnitiv cəhətdən uyğun izahlar təmin edir, verifikasiya isə ontologiyalarla qeyri-səlis məntiqin inteqrasiyasının məşin öyrənməsi nəticələrinə etimadın artırılması və qeyri-səlis biliklərlə işləmək üçün formal əsas yaratdığını sübut edir. Təklif olunan sistemin elmi-tədqiqat kodunun işçi versiyası və tətbiq təlimatı GitHub onlayn resursunda yerləşdirilmişdir¹⁴.

Nəticədə işin icrası zamanı əldə olunmuş elmi və praktiki nəticələr verilmişdir.

İŞİN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ

Əsas nəticələr qarşıya qoyulmuş vəzifələrə tam uyğundur və aşağıdakılardan ibarətdir:

1. İzah oluna bilən Sİ sistemlərinin qurulmasına dair müasir yanaşmalar təhlil edilmiş, nəticədə mövcud alqoritmik və ontoloji izah metodlarının, müvafiq olaraq, semantik dərinliyin yetərsizliyi və real verilənlərin qeyri-müəyyənliyinin adekvat nəzərə alınma bilməməsi ilə bağlı məhdudyyətləri aşkar edilmişdir.
2. Ekspert biliklərinin ontoloji təqdimatı vasitəsi kimi izahedici xüsusiyyətlər konsepsiyası işlənmiş və formallaşdırılmışdır; bu konsepsiya məntiqi asılılıqlar, obyektlərin funksional

¹⁴ Kosov, P. Fuzzy Ontology Explanatory Properties Research Code: [Electronic resource] / GitHub. – 2025. URL: <https://github.com/pavelkosov99/Fuzzy-Ontology-Explanatory-Properties-Research-Code>

təyinatı və istifadəçinin qavrayış xüsusiyyətləri nəzərə alınmaqla verilənlərin intellektual təhlili nəticələrinin interpretasiyasını təmin edir.

3. İstifadəçinin mental modelləri konsepsiyasından izahların qurulmasında istifadənin məqsədəuyğunluğu əsaslandırılmış və göstərilmişdir ki, izahın istifadəçinin koqnitiv təsəvvürləri ilə uzlaşdırılması onun anlaşılıqlığını və müxtəlif istifadəçi kateqoriyaları üçün tətbiqi dəyərini artırır.
4. İzah oluna bilən süni intellekt tapşırıqlarında qeyri-dəqiq biliklərin təqdimatı və emalı üçün semantik texnologiyalarla qeyri-səlis məntiq metodlarının inteqrasiyasına əsaslanan qeyri-səlis izah oluna bilmə metodologiyası təklif edilmiş və nəzəri cəhətdən əsaslandırılmışdır.
5. Fuzzy OWL2 qeyri-səlis ontologiyalarından istifadə etməklə izahedici xüsusiyyətlərin və ontoloji aksiomların təqdim edilməsi metodu işlənmişdir; bu metod inam dərəcəsinin kəmiyyət qiymətləndirilməsi ilə izahların formalaşdırılmasını təmin edir.
6. Verilənlərdən əldə olunmuş mənsubiyyət dərəcələri əsasında qeyri-səlis ontologiyada obyektlərin xüsusiyyətləri haqqında müddələrin avtomatik formalaşdırılmasına imkan verən qeyri-səlis klasterləşdirmə nəticələrinin emalı proseduru işlənmişdir.
7. Qeyri-səlis təsviri məntiqlər aparatına əsaslanan qeyri-səlis semantik izahların generasiya mexanizmi işlənmişdir; bu mexanizm modellərin özlərini modifikasiya etmədən «qara qutu» tipli modellərin iş nəticələri üçün məntiqi cəhətdən əsaslandırılmış və interpretasiya edilə bilən izahların alınmasını təmin edir.
8. Təklif olunan metodologiyanın müxtəlif predmet sahələrinə aid altı verilənlər toplusunda eksperimental aprobeşiyası aparılmışdır. Əldə olunmuş nəticələr işlənmiş yanaşmanın universallığını, miqyaslı bilməsini və praktik səmərəliliyini təsdiqləmişdir.

Təklif olunan metodologiya yeni nəsillə XAI sistemləri üçün elmi və praktiki zəmin yaradır. Semantik şəbəkə və qeyri-səlis məntiqi

inteqrasiya edən sistemin real dünya verilənlərinin real qeyri-müəyyənliyini adekvat əks etdirə bildiyi sübut edilmişdir. Bu yanaşma yalnız daha şəffaf deyil, həm də daha etibarlı və etimad doğuran süni intellekt sistemlərinin yaradılmasına imkan verir.

Dissertasiyanın əsas məzmunu aşağıdakı elmi işlərdə dərc olunmuşdur:

1. Gardashova, L., Kosov, P. A Review of the Solutions for Autonomous Exposure of Intrusions and Malicious Activities in Automated Networks in the Environment of Big Datasets // – Bakı: Azərbaycan Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri, – 2023. c. 30, № 07, – s. 338-350.
2. Косов, П.И. Объяснимый искусственный интеллект: исследование нового метода для улучшения объяснений на основе онтологий // Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 101-ci ildönümünə həsr olunmuş Doktorantların və Gənc Tədqiqatçıların Respublika Elmi Konfransının Materialları, – Bakı: – 6-7 may, – 2024, – s. 1-5.
3. Kosov, P. Advancing XAI: new properties to broaden semantic-based explanations of black-box learning models / P. Kosov, N. El Kadhi, C. Zanni-Merk, L. Gardashova // Procedia Computer Science, – 2024. vol. 246, – p. 2292-2301.
4. Косов, П.И. Краткий разбор логики объяснимого искусственного интеллекта и её нечёткости с применением онтологий // Труды X Международной Научной Конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений», – Уфа: – 12-14 ноября, – 2024, – с. 23-28.
5. Qardaşova, L.A., İbrahimova, S.R., Kosov, P.İ. Şüşənin kimyəvi tərkibinə əsaslanan identifikasiyasında izah oluna bilən süni intellektin tətbiqi // – Bakı: Elmi Məcmuə (Milli Aviasiya Akademiyası), – 2025. c. 26, № 4, – s. 91-99.
6. Kosov, P., El Kadhi, N., Zanni-Merk, C., Gardashova, L. Semantic-Based XAI: Leveraging Ontology Properties to Enhance Explainability // Proceedings of the 2024

- International Conference on Decision Aid Sciences and Applications, – Manama: – 11-12 December, – 2024, – p. 1-5.
7. Qardaşova, L.A., Kosov, P.İ. İzah oluna bilən süni intellekt və onun sənayedə tətbiqlərinin icmalı // – Bakı: Azərbaycan Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri, – 2025. c. 49, № 02, – s. 601-621.
 8. Косов, П.И. Анализ объяснимости вторжений и вредоносной деятельности в компьютерных сетях посредством нечёткой онтологии // Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 102-ci ildönümünə həsr olunmuş Doktorantların və Gənc Tədqiqatçıların Respublika Elmi Konfransının Materialları, – Bakı: – 7-8 may, – 2025, – s. 1-4.
 9. Косов, П.И., Гардашова, Л.А. Повышение достоверности объяснимого искусственного интеллекта посредством нечеткой логики и онтологии // – Воронеж: Моделирование, Оптимизация и Информационные Технологии, – 2025. т. 13, № 2(49), – с. 1-11.
 10. Косов, П.И. Разработка нечёткой онтологии для объяснимого искусственного интеллекта для принятия решений в нечёткой среде // – Tashkent: Chemical Technology, Control and Management, – 2025. vol. 2025, № 2, – p. 19-26.

İddiaçının həmmüəllifliklə dərc edilmiş əsərlərdə şəxsi rolu:

[1], [3], [5], [6], [7], [9] – nəzəri tədqiqatlar, proqram implementasiyası, verifikasiyanın aparılması və tədqiqatların məqalə formatında rəsmiləşdirilməsi.

Dissertasiyanın müdafiəsi 05 may 2026-cı il tarixində saat 14:00-da Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən FD 2.48 sayılı Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

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

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

Avtoreferatın elektron versiyası Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 02 aprel 2026-cı il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.



Çapa imzalanıb: 12.03.2026

Kağızın formatı: A5

Həcm: 38 500

Tiraj: 30