

T.T.Sufanzadə  
doktorant, Odlar Yurdu Universiteti  
sufanzade@gmail.com

Məqalə redaksiyaya daxil olub 04.02.2026

The article was received by editorial board on 04.02.2026

Статья принята к печати 04.02.2026

## İNTELLEKTUAL ALQORİTMLƏR VASİTƏSİLƏ ENERJİ İSTEHLAKINDA QEYRİ-ADİ DAVRANIŞLARIN MÜƏYYƏNLƏŞDİRİLMƏSİ

### Xülasə

Müasir enerji sistemlərinin mürəkkəbləşməsi və istehlak həcminin artması enerji məlumatlarının effektiv analizini strateji zərurətə çevirmişdir. Enerji sektorunun sürətli rəqəmsallaşması və istehlak həcminin artması enerji məlumatlarının daha dəqiq və operativ analizini vacib etmişdir. Enerji istehlakında qeyri-adi davranışların (anomaliyaların) vaxtında müəyyənəşdirilməsi texniki nasazlıqların qarşısının alınması, enerji itkilərinin azaldılması, qeyri-qanuni müdaxilələrin aşkar edilməsi və enerji təhlükəsizliyinin gücləndirilməsi baxımından mühüm əhəmiyyət daşıyır. Ənənəvi statistik yanaşmalar mürəkkəb və böyük həcmli verilənlər üzərində işləməkdə müəyyən məhdudiyyətlərə malik olduğundan, son illərdə intellektual alqoritmlərin tətbiqi geniş yayılmışdır.

Bu məqalədə enerji istehlakı sistemlərində anomaliyaların aşkarlanması üçün süni neyron şəbəkələri, fuzzy məntiq, maşın öyrənməsi və hibrid modellər kimi soft computing metodlarının nəzəri və praktik aspektləri geniş şəkildə təhlil edilmişdir. Tədqiqat çərçivəsində çoxmərhləli intellektual model təklif olunmuş, onun tətbiq üstünlükləri və potensial riskləri qiymətləndirilmişdir. Araşdırma göstərir ki, intellektual yanaşmalar enerji idarəetməsinin optimallaşdırılmasına, qərarvermə prosesinin avtomatlaşdırılmasına və dayanıqlı enerji strategiyalarının formalaşdırılmasına mühüm töhfə verə bilər.

**Açar sözlər:** enerji istehlakı, anomaliya deteksiyası, soft computing, süni intellekt, maşın öyrənməsi.

### GİRİŞ

Müasir dünyada enerji yalnız iqtisadi inkişafın deyil, həm də milli təhlükəsizliyin əsas faktorlarından biridir. Dövlətlərin dayanıqlı inkişaf strategiyalarında enerji resurslarının etibarlı idarə olunması prioritet hesab olunur, çünki enerji təminatında yaranan fasilələr sənaye, nəqliyyat, kommunikasiya sistemləri və sosial rifah üçün ciddi risklər yaradır. Sənaye istehsalının genişlənməsi, urbanizasiya və əhali artımı enerji tələbatının davamlı yüksəlməsinə səbəb olmuşdur. Eyni zamanda, məişət texnologiyaları və elektriklə işləyən nəqliyyat vasitələrinin artması enerji bazarına təzyiqli gücləndirir və sistemlərin daha çevik, etibarlı və ağıllı idarə olunmasını tələb edir.

İqlim dəyişiklikləri və ekoloji çağırışlar enerji sektorunda yeni yanaşmaların tətbiqini zəruri edir. Karbon emissiyalarının azaldılması və bərpa olunan enerji mənbələrinin balanslı inteqrasiyası enerji siyasətinin əsas istiqamətlərindəndir. Lakin bərpa olunan enerji mənbələrinin dəyişkənliyi enerji sistemlərinin idarə olunmasını mürəkkəbləşdirir və dəqiq monitoring, proqnozlaşdırma mexanizmlərini tələb edir.

Rəqəmsallaşma və informasiya-kommunikasiya texnologiyaları enerji sektorunda fundamental dəyişikliklər yaratmışdır. Smart grid texnologiyaları, sensor şəbəkələri və IoT cihazları real vaxt rejimində məlumat toplanmasına imkan verərək operativ qərar qəbulunu dəstəkləyir. Eyni zamanda, böyük verilənlərin təhlili enerji istehlakının proqnozlaşdırılması, risklərin müəyyən edilməsi və resursların optimal istifadəsi üçün strateji əhəmiyyət daşıyır.

Ənənəvi statistik üsulların mürəkkəb və dinamik enerji sistemlərində məhdudiyətləri mövcuddur. Bu səbəbdən süni intellekt və maşın öyrənməsi texnologiyaları enerji məlumatlarının analizində effektiv vasitələr kimi ön plana çıxır. Bu alqoritmlər böyük verilənlərdəki mürəkkəb əlaqələri aşkar edə, normal və qeyri-normal davranış modellərini fərqləndirə və real vaxt rejimində adaptiv qərar qəbulunu təmin edə bilər.

Elmi yenilik. Təklif olunan yanaşma enerji istehlakında anomaliyaların aşkarlanmasında intellektual alqoritmlərin tətbiqi ilə ənənəvi metodların məhdudiyətlərini aradan qaldırır, idarəetmənin proaktiv xarakter almasına imkan yaradır və enerji resurslarının daha rəasional istifadəsini təmin edir.

Aktuallıq. Enerji sistemlərinin mürəkkəbliyi, rəqəmsallaşma və bərpa olunan enerji mənbələrinin dəyişkənliyi idarəetmə proseslərini çətinləşdirir. Bu səbəbdən intellektual alqoritmlərin tətbiqi yalnız texniki səmərəliliyi artırmaqla kifayətlənmir, həm də əməliyyat xərclərinin azalmasına, risklərin minimuma endirilməsinə və dayanıqlı enerji strategiyalarının həyata keçirilməsinə töhfə verir.

Məqalənin əsas məqsədi enerji istehlakında qeyri-adi davranışların aşkarlanmasında intellektual alqoritmlərin rolunu araşdırmaq, onların üstünlüklərini və tətbiq sahələrini təhlil etmək, həmçinin gələcək inkişaf perspektivlərini müəyyən etməkdir. Araşdırmanın nəticələri enerji idarəetmə mexanizmlərinin təkmilləşdirilməsinə və dayanıqlı enerji sistemlərinin formalaşmasına töhfə verəcəkdir.

## **ƏSAS HİSSƏ**

Anomaliya anlayışı ümumilikdə sistemin gözlənilən və ya əvvəlcədən müəyyən edilmiş davranış modelindən kənara çıxan hadisələri ifadə edir. Başqa sözlə, anomaliya normal fəaliyyət çərçivəsinə uyğun gəlməyən, statistik və ya funksional baxımdan fərqlənən göstərici kimi xarakterizə olunur. Müasir enerji sistemləri çoxsaylı komponentlərin qarşılıqlı əlaqəsi əsasında fəaliyyət göstərdiyindən bu sistemlərdə baş verən ən kiçik dəyişiklik belə ümumi iş rejiminə təsir göstərə bilər. Bu baxımdan anomaliyaların düzgün və vaxtında müəyyənləşdirilməsi enerji infrastrukturalarının etibarlılığının qorunması üçün xüsusi əhəmiyyət kəsb edir.

Enerji sistemlərində müşahidə olunan kənarlaşmalar çox vaxt texniki problemlərin ilkin siqnalları kimi çıxış edir. Məsələn, elektrik avadanlığında baş verən kiçik bir gərginlik dalğalanması gələcəkdə daha ciddi nasazlığın xəbərçisi ola bilər. Əgər bu cür dəyişikliklər erkən mərhələdə aşkarlanarsa, profilaktik tədbirlərin görülməsi mümkün olur və beləliklə, həm böyük miqyaslı qəzaların qarşısı alınır, həm də texniki xidmət xərcləri azalır. Erkən diaqnostika yanaşması müasir enerji idarəetmə strategiyalarının əsas elementlərindən biri hesab olunur, çünki bu yanaşma reaktiv deyil, proaktiv idarəetməni təşviq edir.

Enerji istehlakında anomaliyaların yaranmasına təsir edən faktorlar müxtəlif və çoxşaxəlidir. Bu faktorların bir qismi texniki xarakter daşıyarsa, digərləri insan fəaliyyəti və ya xarici mühitlə bağlı ola bilər. Məsələn, avadanlıqların köhnəlməsi enerji sistemlərində ən çox rast gəlinən problemlərdən biridir. Uzun müddət istismar olunan transformatorlar, generatorlar və ya paylayıcı xətlər zamanla effektivliyini itirir, nəticədə enerji ötürülməsi zamanı itkilər artır və qeyri-sabit iş rejimi formalaşır. Texniki nasazlıqlar bəzən ani şəkildə baş versə də, əksər hallarda onların ilkin əlamətləri enerji istehlakı göstəricilərindəki kiçik sapmalar şəklində müşahidə olunur.

Ölçmə cihazlarında baş verən kalibrasiya səhvləri də anomaliyaların yaranmasına səbəb ola bilər. Smart sayğaclar və digər ölçü avadanlıqları enerji monitorinqinin əsasını təşkil etdiyindən onların təqdim etdiyi məlumatların dəqiqliyi böyük əhəmiyyət daşıyır. Cihazın yanlış ölçməsi nəticəsində real istehlakdan fərqli göstəricilər qeydə alınır ki, bu da sistemin analizi zamanı səhv qərarların qəbuluna gətirib çıxarar. Buna görə də ölçmə infrastrukturunun mütəmadi yoxlanılması və kalibrasiyası enerji idarəetməsinin vacib şərtlərindən biridir.

Ekstremal hava şəraiti də enerji istehlakı davranışına birbaşa təsir göstərən amillər sırasındadır. Məsələn, kəskin soyuq hava istilik sistemlərinə tələbatı artıraraq elektrik yüklənməsində pik hədd yarada bilər. Eyni şəkildə, uzunmüddətli isti hava dalğaları kondisioner istifadəsini çoxaldaraq şəbəkəyə əlavə təzyiq göstərir. Güclü külək, qar və ya fırtına kimi təbii hadisələr isə elektrik xətlərinin zədələnməsinə səbəb olaraq sistemdə qeyri-adi dəyişikliklər yarada

bilər. Bu cür hallarda anomaliyaların düzgün qiymətləndirilməsi onların müvəqqəti xarakter daşıyıb-daşmadığını müəyyən etməyə kömək edir.

İstehlakçı davranışındakı dəyişikliklər də enerji istehlakı profilinə təsir edən mühüm faktorlardan biridir. Məsələn, yeni sənaye müəssisəsinin fəaliyyətə başlaması, böyük ticarət mərkəzlərinin açılması və ya yaşayış məntəqələrinin genişlənməsi enerji tələbatında gözlənilməz artıma səbəb ola bilər. Bəzi hallarda isə istehlakçıların enerji qənaətinə yönəlmiş texnologiyalara keçidi ümumi istehlakın azalması ilə nəticələnir. Bu dəyişikliklərin hamısı sistem tərəfindən düzgün interpretasiya edilmədikdə anomaliya kimi qiymətləndirilə bilər. Buna görə də enerji analizində kontekst faktorunun nəzərə alınması xüsusi əhəmiyyət daşıyır.

Müasir rəqəmsal infrastrukturaların genişlənməsi ilə paralel olaraq kibercümlər də enerji sektorunun üzləşdiyi yeni risklərdən birinə çevrilmişdir. Enerji idarəetmə sistemlərinə icazəsiz müdaxilə məlumatların təhrif olunmasına, saxta göstəricilərin yaradılmasına və hətta şəbəkənin fəaliyyətinin pozulmasına səbəb ola bilər. Belə halların vaxtında aşkarlanması yalnız texniki deyil, həm də strateji təhlükəsizlik baxımından vacibdir.

Qeyri-qanuni enerji istifadəsi, yəni enerji oğurluğu da bir çox ölkələrdə ciddi problem olaraq qalmaqdadır. Qanunsuz qoşulmalar şəbəkədə əlavə yüklənmə yaradır, enerji paylanması balansını pozur və nəticədə həm şirkətlər, həm də digər istehlakçılar üçün mənfi nəticələr doğurur. Bu tip anomaliyaların aşkarlanması üçün intellektual analiz metodlarının tətbiqi daha effektiv hesab olunur, çünki bu metodlar istehlak davranışındakı şübhəli nümunələri avtomatik şəkildə müəyyən edə bilir.

Elmi ədəbiyyatda anomaliyalar adətən üç əsas kateqoriya üzrə təsnif edilir və bu bölgü analiz prosesinin sistemli şəkildə aparılmasına kömək edir. Nöqtəvi anomaliyalar verilənlər toplusunda digərlərindən kəskin şəkildə fərqlənən tək müşahidələrdir. Məsələn, sabit istehlak profilinə malik bir abonentin müəyyən gündə normadan bir neçə dəfə artıq enerji istifadə etməsi belə anomaliyaya nümunə ola bilər. Bu tip kənarlaşmaların müəyyən edilməsi nisbətən asan olsa da, onların səbəbinin düzgün interpretasiyası əlavə analiz tələb edir.

Kontekstual anomaliyalar isə yalnız müəyyən zaman və ya şərait daxilində qeyri-normal hesab olunur. Məsələn, qış aylarında yüksək elektrik istehlakı adətən normal sayılır, lakin eyni göstərici yaz mövsümündə qeyri-adi görünə bilər. Bu səbəbdən kontekstual anomaliyaların aşkarlanması zamanı mövsümi dəyişikliklər, iş saatları və sosial faktorlar kimi əlavə dəyişənlər nəzərə alınmalıdır.

Kollektiv anomaliyalar daha mürəkkəb xarakter daşıyır. Bu halda ayrı-ayrı göstəricilər normal intervalda yerləşsə də, onların ardıcıl və ya kombinasi olunmuş şəkildə təhlili qeyri-adi tendensiyanı üzə çıxarır. Məsələn, enerji istehlakının bir neçə gün ərzində tədricən artması ilk baxışdan adi görünə bilər, lakin bu artım davamlı xarakter alarsa, potensial texniki problemin göstəricisi ola bilər. Belə anomaliyaların müəyyən edilməsi üçün daha inkişaf etmiş analitik modellərə ehtiyac yaranır.

Bu təsnifat anomaliya deteksiyası üçün uyğun alqoritmin seçilməsində mühüm rol oynayır. Çünki hər bir anomaliya növü fərqli analiz yanaşması tələb edir. Nöqtəvi anomaliyalar statistik metodlarla aşkar edilə bildiyi halda, kontekstual və kollektiv anomaliyaların müəyyənləşdirilməsi üçün daha çox intellektual və adaptiv modellərdən istifadə olunur. Düzgün metodun seçilməsi isə aşkarlama dəqiqliyini artırmaqla yanaşı, yanlış siqnalların sayını da azaldır.

Enerji sistemlərində anomaliya anlayışının dərinlənə öyrənilməsi və bu kənarlaşmaların yaranma səbəblərinin düzgün analiz edilməsi daha etibarlı, təhlükəsiz və davamlı enerji infrastrukturunun qurulmasına şərait yaradır. Müasir dövrdə enerji sektorunun artan mürəkkəbliyi fonunda anomaliyaların vaxtında müəyyənləşdirilməsi yalnız texniki zərurət deyil, həm də strateji idarəetmə aləti kimi çıxış edir.

Soft computing və intellektual alqoritmlər müasir informasiya texnologiyalarının ən sürətlə inkişaf edən istiqamətlərindən biri hesab olunur. Bu yanaşma ənənəvi "sərt hesablama" metodlarından fərqli olaraq qeyri-müəyyən, natamam və bəzən ziddiyyətli məlumatların emalına imkan verir. Klassik hesablama modelləri adətən dəqiq və tam verilənlərə əsaslanaraq deterministik nəticələr təqdim edir. Lakin real həyat problemləri, xüsusilə enerji sistemləri kimi mürəkkəb və

çoxparametrlı mühitlər, nadir hallarda tam və strukturlaşdırılmış məlumatlarla xarakterizə olunur. Məhz bu səbəbdən soft computing yanaşması belə mühitlərdə daha effektiv hesab edilir.

Soft computing-in əsas ideyası insan düşüncə tərzinin elastikliyi və adaptivliyini modelləşdirməkdir. İnsan beyni qərar qəbul edərkən hər zaman tam və dəqiq informasiyaya malik olmur, buna baxmayaraq, mövcud biliklər və təcrübə əsasında optimal seçim etməyi bacarır. Soft computing metodları da oxşar prinsiplə işləyərək qeyri-dəqiqliyi və qeyri-müəyyənliyi qəbul edir, onları sistemin zəif tərəfi kimi deyil, əksinə, modelləşdirmə prosesinin təbii elementi kimi qiymətləndirir. Bu xüsusiyyət xüsusilə enerji istehlakı kimi dəyişkən və proqnozlaşdırılması çətin olan sahələrdə mühüm üstünlük yaradır.

Soft computing çərçivəsində bir neçə əsas texnologiya formalaşmışdır ki, onların hər biri mürəkkəb problemlərin həllinə fərqli yanaşma təqdim edir. Bu komponentlər bir-birini tamamlayaraq daha güclü və adaptiv intellektual sistemlərin qurulmasına şərait yaradır.

Süni neyron şəbəkələri soft computing-in ən geniş tətbiq olunan istiqamətlərindən biridir. Bu modellər insan beynindəki neyronların fəaliyyət prinsipindən ilhamlanaraq yaradılmışdır və böyük həcmli verilənlərdə gizli qanunauyğunluqları aşkar etmək qabiliyyətinə malikdir. Neyron şəbəkələri xüsusilə qeyri-xətti proseslərin modelləşdirilməsində effektivdir. Enerji sistemlərində istehlakın hava şəraiti, günün saati, iqtisadi aktivlik və digər amillərdən asılı olaraq dəyişməsi bu texnologiyanın tətbiqini daha da aqtyallaşdırır. Şəbəkə əvvəlki məlumatlar əsasında öyrənərək normal davranış modelini formalaşdırır və bu modeldən kənara çıxan halları avtomatik şəkildə müəyyən edə bilir. Adaptiv öyrənmə qabiliyyəti sayəsində belə sistemlər zaman keçdikcə daha dəqiq nəticələr təqdim edir.

Fuzzy məntiq soft computing-in digər mühüm komponentidir və qeyri-dəqiq anlayışların riyazi modelləşdirilməsinə imkan verir. Klassik məntiqdə dəyişənlər adətən ikili formada qiymətləndirildiyi halda, fuzzy məntiq aralıq dəyərləri də nəzərə alır. Məsələn, enerji istehlakının “yüksək” və ya “aşağı” olması hər zaman konkret sərhədlərlə müəyyən edilmir; bu göstəricilər kontekstdən asılı olaraq dəyişə bilər. Fuzzy yanaşma bu qeyri-müəyyənliyi formal qaydalar vasitəsilə modelləşdirərək daha real qərar vermə mexanizmi yaradır. Xüsusilə risklərin qiymətləndirilməsi və ekspert biliklərinin sistemə inteqrasiyası baxımından fuzzy məntiq olduqca effektivdir (Zadeh, 1965).

Genetik alqoritmlər təbii seçmə və təkamül prinsiplərinə əsaslanan optimallaşdırma metodlarıdır. Bu alqoritmlər mümkün həll variantlarını “populyasiya” şəklində nəzərdən keçirir və ən uyğun variantları seçərək iterativ şəkildə daha optimal nəticələrə doğru inkişaf edir. Enerji sistemlərində genetik alqoritmlər yüklənmənin optimallaşdırılması, enerji paylanması səmərələşdirilməsi və proqnoz modellərinin parametrlərinin tənzimlənməsi kimi məsələlərdə geniş istifadə olunur. Onların əsas üstünlüyü mürəkkəb və çoxölçülü problemlərdə global optimuma yaxın nəticələr əldə etmək qabiliyyətidir.

Maşın öyrənməsi metodları da soft computing çərçivəsində mühüm yer tutur. Bu metodlar verilənlərdən öyrənərək əvvəlcədən proqramlaşdırılmadan proqnozlar vermək və ya qərarlar qəbul etmək imkanına malikdir. Nəzarətli, nəzarətsiz və gücləndirici öyrənmə kimi alt istiqamətlər müxtəlif tip problemlərin həllinə uyğunlaşdırıla bilər. Enerji istehlakı analizində maşın öyrənməsi alqoritmləri davranış nümunələrini müəyyənləşdirir, anomaliaları aşkar edir və gələcək tələbatı proqnozlaşdırır. Böyük verilənlərin artması bu texnologiyaların tətbiq sahəsini daha da genişləndirmişdir (Ghahramani, 2015).

Ehtimal modelləri isə qeyri-müəyyənliyin riyazi qiymətləndirilməsinə imkan verərək qərar vermə prosesində risk faktorunun nəzərə alınmasını təmin edir. Statistik yanaşmalar və Bayes modelləri kimi metodlar müxtəlif ssenarilərin başvermə ehtimalını hesablayaraq daha əsaslandırılmış qərarların qəbuluna kömək edir. Enerji sektorunda bu cür modellər, məsələn, pik yüklənmələrin başvermə ehtimalının qiymətləndirilməsi və ya avadanlıq nasazlıqlarının proqnozlaşdırılması üçün istifadə oluna bilər.

Bu texnologiyaların ayrı-ayrılıqda tətbiqi müəyyən üstünlüklər təqdim etsə də, onların inteqrasiyası daha güclü nəticələr əldə etməyə imkan verir. Məsələn, neyron şəbəkələrinin öyrənmə qabiliyyəti fuzzy məntiqin interpretasiya imkanları ilə birləşdirildikdə həm dəqiq, həm də izah edilə

bilən modellər yaratmaq mümkün olur. Eyni şəkildə, genetik alqoritmlər maşın öyrənməsi modellərinin parametrlərini optimallaşdıraraq sistemin ümumi performansını artırır.

Soft computing texnologiyalarının birgə istifadəsi enerji sistemlərində daha dayanıqlı və adaptiv analiz mexanizmlərinin formalaşmasına şərait yaradır. Bu yanaşma dəyişən mühitə sürətli uyğunlaşmanı təmin edir, qərarvermə prosesini avtomatlaşdırır və potensial risklərin daha erkən mərhələdə müəyyən edilməsinə kömək edir. Nəticə etibarilə, intellektual alqoritmlərə əsaslanan sistemlər enerji idarəetməsinin keyfiyyətini yüksəldərək daha etibarlı və səmərəli infrastrukturun qurulmasına töhfə verir.

Süni neyron şəbəkələri müasir süni intellekt texnologiyalarının əsas istiqamətlərindən biri kimi mürəkkəb sistemlərin analizində geniş tətbiq olunur. Bu modellər insan beyninin informasiya emalı prinsipindən ilhamlanaraq yaradılmış və çoxölçülü verilənlərdə gizli əlaqələri aşkar etmək qabiliyyəti ilə seçilmişdir. Enerji istehlakı isə dinamik, dəyişkən və çoxsaylı amillərdən asılı olan qeyri-xətti prosesdir. Hava şəraiti, günün saati, mövsümi dəyişikliklər, istehlakçı davranışı və iqtisadi aktivlik kimi faktorlar enerji tələbatına birbaşa təsir göstərir. Bu səbəbdən belə mürəkkəb strukturun modelləşdirilməsi üçün ənənəvi statistik metodlar bəzən kifayət etmir, halbuki neyron şəbəkələri bu cür çoxparametrlı mühitlərdə daha yüksək effektivlik nümayiş etdirir.

Neyron şəbəkələrinin enerji anomaliyalarının aşkarlanmasında əsas üstünlüyü onların öyrənmə qabiliyyəti ilə bağlıdır. Model ilkin mərhələdə tarixi verilənlər əsasında “normal” istehlak davranışını öyrənir və sistem üçün referens model formalaşdırır. Bu proses təlim mərhələsi adlanır və burada alqoritm verilənlərdə mövcud olan qanunauyğunluqları müəyyənləşdirir. Daha sonra real vaxt rejimində daxil olan yeni məlumatlar həmin model ilə müqayisə edilir. Əgər müşahidə olunan göstəricilər gözlənilən diapazondan kəskin şəkildə fərqlənsə, sistem bunu potensial anomaliya kimi qeyd edir və operatorlara xəbərdarlıq edə bilər. Bu yanaşma texniki nasazlıqların, qeyri-qanuni qoşulmaların və ya qəfil yüklənmələrin erkən mərhələdə müəyyən edilməsinə imkan yaradır.

Süni neyron şəbəkələrinin ən mühüm üstünlüklərindən biri yüksək dəqiqlik səviyyəsidir. Xüsusilə böyük verilənlər üzərində təlim keçmiş modellər çox incə sapmaları belə aşkar edə bilər. Bu isə enerji sistemlərində risklərin minimuma endirilməsi və idarəetmənin optimallaşdırılması baxımından mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Digər vacib xüsusiyyət adaptiv öyrənmə qabiliyyətidir. Enerji istehlakı sabit olmadığından sistem zamanla yeni davranış modelləri ilə qarşılaşır. Neyron şəbəkələri bu dəyişikliklərə uyğunlaşaraq öz parametrlərini yeniləyə və beləliklə də aktuallığını qoruyub saxlaya bilər.

Avtomatik xüsusiyyət çıxarma (feature extraction) da bu texnologiyanın diqqətəlayiq üstünlüklərindən hesab olunur. Ənənəvi modellərdə analitiklər hansı göstəricilərin vacib olduğunu əvvəlcədən müəyyən etməlidirlər. Neyron şəbəkələri isə verilənlərdəki mühüm strukturları və əlaqələri müstəqil şəkildə müəyyən edərək insan müdaxiləsinə olan ehtiyacı azaldır. Bu, xüsusilə böyük həcmli və strukturlaşdırılmamış verilənlərlə işləyərkən ciddi üstünlük yaradır.

Real vaxt analiz imkanı da enerji infrastrukturunu üçün strateji əhəmiyyət daşıyır. Müasir smart şəbəkələrdə məlumat axını fasiləsiz şəkildə davam edir və qərarların operativ qəbul edilməsi tələb olunur. Neyron şəbəkələrinə əsaslanan sistemlər saniyələr ərzində milyonlarla göstəricini emal edərək anomaliyaları dərhal aşkar edə bilər. Nəticədə qəza riskləri azalır, xidmət keyfiyyəti yüksəlir və iqtisadi itkilərin qarşısı alınır (Zheng et al., 2017).

Bununla yanaşı, süni neyron şəbəkələrinin tətbiqi müəyyən çətinliklərlə də müşayiət olunur. İlk növbədə, bu modellərin effektiv işləməsi üçün böyük həcmli və keyfiyyətli təlim verilənlərinə ehtiyac var. Verilənlərin natamam və ya qeyri-dəqiq olması modelin nəticələrinə mənfi təsir göstərə bilər. Digər mühüm məsələ hesablama xərclərinin yüksək olmasıdır. Dərin arxitekturalara malik şəbəkələrin təlimi güclü hesablama resursları tələb edir ki, bu da bəzi təşkilatlar üçün əlavə maliyyə yükü yarada bilər.

Modellərin izah edilə bilməsi (interpretability) problemi də aktual olaraq qalır. Neyron şəbəkələri çox vaxt “qara qutu” kimi xarakterizə olunur, yəni modelin konkret qərarı hansı səbəbdən verdiyini izah etmək çətin olur. Enerji sektoru kimi kritik infrastrukturda isə qərarların şəffaflığı və əsaslandırılması xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Bu səbəbdən son dövrlərdə izah edilə bilən süni intellekt (Explainable AI) yanaşmalarına maraq artmışdır.

Son illərə deep learning texnologiyalarının inkişafı neyron şəbəkələrinin imkanlarını daha da genişləndirmişdir. Xüsusilə rekurrent neyron şəbəkələri (RNN), uzun qısamüddətli yaddaş modelləri (LSTM) və konvolyusion şəbəkələr zaman sıralarının analizində yüksək nəticələr göstərmişdir. Bu modellər enerji istehlakının zamanla dəyişən strukturunu daha dəqiq öyrənərək həm qısamüddətli, həm də uzunmüddətli sapmaları müəyyən edə bilir. Böyük enerji şəbəkələrinin idarə olunmasında deep learning yanaşmaları proqnozlaşdırma dəqiqliyini artırmaqla yanaşı, preventiv texniki xidmət strategiyalarının hazırlanmasına da töhfə verir (Kaur & Bhatia, 2020).

Ümumilikdə, süni neyron şəbəkələri enerji anomaliyalarının aşkarlanmasında güclü və perspektivli alət kimi çıxış edir. Onların mürəkkəb verilənlərdə gizli nümunələri aşkar etmək, dəyişən şəraitə uyğunlaşmaq və real vaxt rejimində analiz aparmaq qabiliyyəti enerji sistemlərinin daha etibarlı və səmərəli idarə olunmasına şərait yaradır. Texnoloji inkişaf davam etdikcə bu sahədə daha izah edilə bilən, daha az resurs tələb edən və daha yüksək dəqiqlik təqdim edən modellərin formalaşacağı gözlənilir ki, bu da gələcəyin ağıllı enerji şəbəkələrinin qurulmasında mühüm rol oynayacaq.

Fuzzy məntiq qeyri-müəyyən və dəqiq sərhədlərlə ifadə olunmayan proseslərin modelləşdirilməsi üçün yaradılmış mühüm soft computing yanaşmalarından biridir. Klassik məntiq sistemlərində dəyişənlər adətən iki mümkün dəyər alır – “doğru” və ya “yanlış”. Lakin real həyat hadisələri, xüsusilə enerji istehlakı kimi mürəkkəb və dəyişkən proseslər, bu qədər kəskin kateqoriyalarla izah edilə bilməz. Enerji tələbatı müxtəlif amillərin təsiri altında formalaşır və bu göstəricilərin çoxu nisbi xarakter daşıyır. Məhz bu səbəbdən fuzzy məntiq enerji sistemlərinin analizində daha çevik və real yanaşma təqdim edir.

Enerji istehlakı sərt sərhədlərlə xarakterizə olunmur. Məsələn, “yüksək istehlak” anlayışı hər bir region üçün fərqli ola bilər; sənaye zonasında normal sayılan göstərici yaşayış məntəqəsi üçün həddindən artıq hesab edilə bilər. Eyni şəkildə, qış aylarında istilik sistemlərinin aktiv işləməsi səbəbindən artan enerji tələbatı normal qəbul edildiyi halda, yay mövsümündə oxşar göstərici potensial anomaliya kimi qiymətləndirilə bilər. Fuzzy məntiq bu cür qeyri-dəqiqliyi nəzərə alaraq dəyişənləri yalnız konkret rəqəmlərlə deyil, “aşağı”, “orta”, “yüksək” kimi dərəcələrlə ifadə edir və beləliklə, daha real modellərin qurulmasına şərait yaradır.

Fuzzy sistemlərin əsasını qaydalar bazası təşkil edir. Bu qaydalar adətən ekspert biliklərinə və ya əvvəlki müşahidələrə əsaslanaraq formalaşdırılır və “əgər–onda” (if–then) prinsipi ilə işləyir. Məsələn, “Əgər istehlak səviyyəsi yüksəkdirsə və artım sürəti böyükdürsə, risk ehtimalı yüksəkdir” kimi qayda sistemə daxil olan məlumatları interpretasiya etməyə imkan verir. Burada diqqət çəkən məqam odur ki, dəyişənlər yalnız bir kateqoriyaya aid edilmir; onlar eyni anda bir neçə qrupa müəyyən faizlə daxil ola bilər. Məsələn, konkret bir göstərici həm “orta”, həm də “yüksək” istehlak kateqoriyasına qismən uyğun ola bilər. Bu isə qərarvermə prosesini daha elastik və reallığa yaxın edir.

Fuzzy məntiqin enerji anomaliyalarının aşkarlanmasında tətbiqi bir neçə mərhələdən ibarət olur. İlk mərhələdə sistemə daxil olan kəmiyyət göstəriciləri linqvistik dəyişənlərə çevrilir; bu proses fuzzifikasiya adlanır. Daha sonra qaydalar bazası vasitəsilə məlumatlar analiz edilir və mümkün risk səviyyəsi müəyyənləşdirilir. Son mərhələdə isə əldə olunan nəticələr yenidən konkret kəmiyyət formasına salınır ki, bu da defuzzifikasiya prosesi kimi tanınır. Belə strukturlaşdırılmış yanaşma mürəkkəb verilənlərin daha anlaşılqı şəkildə interpretasiya olunmasına kömək edir.

Fuzzy sistemlərin mühüm üstünlüklərindən biri onların interpretasiya edilə bilməsidir. Neyron şəbəkələri ilə müqayisədə fuzzy modellər daha şəffaf hesab olunur, çünki qəbul edilən qərarların arxasında duran qaydaları izləmək mümkündür. Enerji sektoru kimi kritik sahələrdə bu xüsusiyyət xüsusi əhəmiyyət kəsb edir; operatorlar sistemin hansı məntiq əsasında xəbərdarlıq verdiyini başa düşə bilir və lazım gəldikdə qaydalar bazasını yeniləyə bilirlər (Zadeh, 1965)..

Digər vacib üstünlük ekspert biliklərinin sistemə asanlıqla inteqrasiya edilməsidir. Enerji sahəsində çalışan mütəxəssislərin illərlə topladığı təcrübə fuzzy qaydalar vasitəsilə rəqəmsal mühitə ötürülə bilər. Bu, xüsusilə statistik məlumatların məhdud olduğu hallarda effektiv nəticələr əldə etməyə imkan verir. Bundan əlavə, fuzzy modellər qeyri-sabit və dəyişkən mühitlərdə stabil işləməsi ilə seçilir, çünki onlar sərt riyazi asılılıqlardan daha çox elastik məntiq əsaslanır.

Bununla belə, fuzzy məntiqin tətbiqi müəyyən çətinliklərdən də azad deyil. Qaydalar bazasının düzgün qurulması yüksək səviyyədə ekspertiza tələb edir və qaydaların sayı artdıqca sistemin idarə olunması mürəkkəbləşə bilər. Həmçinin çox böyük verilənlər üzərində işləyərkən yalnız fuzzy yanaşma bəzən kifayət etməyə bilər. Bu səbəbdən son dövrlərdə hibrid modellərə maraq artmışdır. Bu cür yanaşmalar neyron şəbəkələrinin öyrənmə qabiliyyətini fuzzy məntiqin interpretasiya imkanları ilə birləşdirərək daha güclü analiz mexanizmləri yaradır.

Fuzzy məntiq enerji istehlakının qeyri-müəyyən xarakterini nəzərə alan, çevik və praktik qərarvermə aləti kimi çıxış edir. Onun tətbiqi anomaliyaların daha həssas şəkildə müəyyən edilməsinə, risklərin düzgün qiymətləndirilməsinə və enerji sistemlərinin daha etibarlı idarə olunmasına töhfə verir. Texnologiyaların inkişafı ilə fuzzy yanaşmaların digər intellektual metodlarla inteqrasiyası gələcəyin ağıllı enerji şəbəkələrinin formalaşmasında mühüm rol oynayacaq.

Maşın öyrənməsi müasir verilənlər analitikasının əsas sütunlarından biri kimi enerji sektorunda getdikcə daha geniş tətbiq sahəsi qazanır. Enerji sistemləri böyük həcmli və davamlı yenilənən məlumat axını ilə xarakterizə olunduğundan bu məlumatların effektiv şəkildə emalı və interpretasiyası ənənəvi metodlarla çətinləşir. Maşın öyrənməsi alqoritmləri isə verilənlərdən öyrənərək istehlak davranışında mövcud olan qanunauyğunluqları müəyyənləşdirir, normal və qeyri-normal hallar arasındakı fərqləri aşkar edə və potensial riskləri əvvəlcədən proqnozlaşdırma bilər. Bu xüsusiyyət enerji anomaliyalarının erkən mərhələdə müəyyən edilməsinə və sistemin daha etibarlı idarə olunmasına şərait yaradır.

Maşın öyrənməsinin əsas üstünlüklərindən biri onun insan müdaxiləsi olmadan adaptiv şəkildə təkmilləşə bilməsidir. Sistem yeni məlumatlar əldə etdikcə modellər yenilənir və beləliklə, dəyişən mühitə uyğunlaşma təmin olunur. Enerji istehlakı isə sabit olmayan, mövsümi və sosial faktorların təsiri altında formalaşan dinamik prosesdir. Buna görə də statik modellərlə müqayisədə öyrənə bilən alqoritmlər daha dəqiq nəticələr təqdim edir.

Enerji anomaliyalarının aşkarlanmasında geniş istifadə olunan metodlardan biri Support Vector Machine (SVM) alqoritmidir. Bu metod verilənləri müxtəlif siniflərə ayıran optimal sərhədi müəyyən etməklə tanınır. SVM xüsusilə yüksək ölçülü verilənlərdə effektiv işləyir və normal istehlak ilə kənarlaşmaları dəqiq şəkildə fərqləndirə bilər. Kiçik və orta həcmli datasetlərdə belə yüksək performans göstərməsi bu metodun praktik əhəmiyyətini artırır (Bishop, 2006).

Random Forest alqoritmisi qərar ağaclarının kombinasiyasına əsaslanan güclü ansambl metodudur. Bu yanaşma bir neçə modelin nəticələrini birləşdirərək daha stabil və etibarlı proqnozlar təqdim edir. Enerji sistemlərində Random Forest həm təsnifat, həm də proqnozlaşdırma məsələlərində uğurla tətbiq olunur. Onun əsas üstünlüklərindən biri overfitting riskini azaltması və müxtəlif tip verilənlərlə effektiv işləyə bilməsidir.

K-means klasterləşdirmə metodu nəzarətsiz öyrənmə yanaşmalarına aid olub, verilənləri oxşar xüsusiyyətlərinə görə qruplaşdırır. Bu metod xüsusilə əvvəlcədən etiketlenməmiş məlumatların analizində faydalıdır. Enerji istehlakı nümunələri klasterlərə bölündükdən sonra həmin qruplardan kənar qalan göstəricilər potensial anomaliya kimi qiymətləndirilə bilər. Bu yanaşma yeni və gözlənilməz davranış modellərinin aşkarlanmasına kömək edir.

Gradient Boosting isə zəif öyrənən modellərin ardıcıl şəkildə birləşdirilməsi ilə daha güclü proqnoz mexanizmi yaradır. Hər yeni model əvvəlkinin səhvlərini minimuma endirməyə çalışır və nəticədə yüksək dəqiqlik əldə olunur. Bu metod xüsusilə mürəkkəb verilən strukturlarında effektivdir və enerji tələbatının proqnozlaşdırılması ilə yanaşı, anomaliyaların müəyyən edilməsində də uğurla istifadə edilir.

Autoencoder modelləri dərin öyrənmə yanaşmalarına aid olub, verilənlərin sıxılmış representasiyasını yaratmaqla onların əsas strukturunu öyrənir. Model normal verilənlər üzərində təlim keçdikdən sonra qeyri-adi nümunələri bərpa etməkdə çətinlik çəkir və bu fərq anomaliyanın göstəricisi kimi çıxış edir. Bu metod xüsusilə böyük verilənlərdə və mürəkkəb zaman sıralarında gizli sapmaların aşkar olunması baxımından effektiv hesab olunur (Wang & Wang, 2021).

Son illərdə aparılan tədqiqatlar göstərir ki, tək bir metoddan istifadə hər zaman optimal nəticə verməyə bilər. Enerji sistemləri çoxqatlı və heterogen struktura malik olduğundan müxtəlif

yanaşmaların integrasiyası daha məqsədəuyğun hesab edilir. Bu kontekstdə hibrid modellər xüsusi diqqət cəlb edir. Məsələn, fuzzy-neural sistemlər fuzzy məntiqin qeyri-müəyyənliyi idarəetmə qabiliyyətini neyron şəbəkələrinin öyrənmə potensialı ilə birləşdirir. Belə modellər həm interpretasiya edilə bilən, həm də yüksək dəqiqliyə malik analiz mexanizmləri yaradır.

Hibrid yanaşmaların digər üstünlüyü onların daha stabil nəticələr təqdim etməsidir. Tək bir alqoritm müəyyən şəraitdə yüksək performans göstərsə də, mühit dəyişdikdə effektivliyi azala bilər. Müxtəlif metodların bir sistemdə birləşdirilməsi bu riski azaldır və modelin ümumi dayanıqlığını artırır. Bundan əlavə, hibrid sistemlər yanlış pozitiv və yanlış neqativ halların sayını minimuma endirməyə kömək edir ki, bu da enerji idarəetməsində qərarların daha etibarlı olmasını təmin edir.

Beləliklə, maşın öyrənməsi və hibrid yanaşmalar enerji anomaliyalarının aşkarlanmasında innovativ və perspektivli istiqamət kimi çıxış edir. Bu texnologiyalar yalnız mövcud problemlərin operativ şəkildə müəyyən edilməsinə deyil, həm də gələcək risklərin proqnozlaşdırılmasına imkan verir. Rəqəmsallaşmanın sürətlənməsi və böyük verilənlərin artması fonunda bu metodların əhəmiyyətinin daha da yüksələcəyi gözlənilir. Nəticə etibarilə, intellektual və integrasiya olunmuş analiz sistemləri gələcəyin ağıllı enerji infrastrukturalarının qurulmasında mühüm rol oynayacaq.

Anomaliya aşkarlanması enerji sistemlərində qeyri-adi davranışların vaxtında və dəqiq müəyyən edilməsini təmin edən çoxmərhələli prosesdir. Bu prosesdə ilk olaraq smart sayğaclar, sensor şəbəkələri və IoT cihazları vasitəsilə enerji istehlakı ilə bağlı məlumatlar toplanır, zaman, mövsüm, coğrafi mövqe və digər kontekstual faktorlar nəzərə alınır. Toplanan məlumatlar təmizlənir, normallaşdırılır və xüsusiyyət mühəndisliyi mərhələsində əlavə informativ dəyişənlər yaradılır ki, model öyrənmə prosesində daha dəqiq nəticələr versin.

Seçilmiş maşın öyrənməsi və ya hibrid modellər təlim verilənləri üzərində öyrədilərək normal enerji davranışını müəyyən edir və real vaxt verilənləri ilə müqayisə apararaq potensial anomal halları aşkarlayır. Modelin performansı Accuracy, Precision, Recall və F1-score metrikaları ilə qiymətləndirilir və real enerji sistemində integrasiya olunaraq davamlı monitorinq həyata keçirilir. Hər hansı qeyri-adi vəziyyət aşkarlandıqda dərhal xəbərdarlıq signalı verilir. Beləliklə, mərhələli yanaşma verilənlərin sistemli analizini təmin etməklə enerji sistemlərinin etibarlılığını artırır, idarəetməni optimallaşdırır və texniki, iqtisadi və strateji baxımdan enerji infrastrukturunu üçün əhəmiyyətli nəticələr yaradır.

## **NƏTİCƏ**

Enerji istehlakında qeyri-adi davranışların vaxtında müəyyənləşdirilməsi müasir enerji idarəetmə sistemlərinin effektivliyini artıran əsas amillərdən biridir. Bu yanaşma yalnız istehlakın monitorinqi ilə məhdudlaşmır, eyni zamanda sistemin potensial risklərə qarşı adaptiv reaksiyasını təmin edir. Aparılan təhlillər göstərir ki, intellektual alqoritmlər böyük həcmli verilənlərin emalında yüksək səmərəliliyə malikdir, verilənlərdəki gizli nümunələri aşkar edir və anomaliyaların erkən mərhələdə proqnozlaşdırılmasını təmin edir. Bu xüsusiyyət enerji infrastrukturunu üçün kritik əhəmiyyət kəsb edir, çünki qəfil yüklənmələr, avadanlıq nasazlıqları və ya qeyri-qanuni enerji istifadəsi ciddi maliyyə və texniki itkilərə səbəb ola bilər.

Süni neyron şəbəkələri mürəkkəb və qeyri-xətti münasibətləri öyrənərək real vaxt rejimində anomaliyaları müəyyən edir, fuzzy məntiq isə qeyri-dəqiq və dəyişkən məlumatları interpretasiya edərək daha çevik qərar verməyə imkan yaradır. Maşın öyrənməsi metodları isə verilənlərdən nümunələri öyrənərək normal və qeyri-normal davranışları fərqləndirir və proqnozlaşdırma qabiliyyətini artırır. Bu texnologiyaların integrasiyası, xüsusilə hibrid modellər şəklində tətbiqi enerji sektorunda daha etibarlı, dayanıqlı və adaptiv idarəetmə modellərinin formalaşmasına şərait yaradır.

Belə sistemlər yalnız texnoloji yenilik kimi qiymətləndirilmir, həm də enerji təhlükəsizliyinin gücləndirilməsi və dayanıqlı inkişafın təmin olunması baxımından strateji əhəmiyyət daşıyır. Real vaxt monitorinqi və anomaliya aşkarlanması operatorlara vaxtında müdaxilə etməyə, resursların səmərəli paylanmasını təmin etməyə və qəza risklərini minimuma endirməyə imkan verir. Nəticədə, intellektual alqoritmlərə əsaslanan enerji idarəetmə sistemləri gələcəyin ağıllı və etibarlı enerji infrastrukturunun əsasını təşkil edir və ölkələrin iqtisadi və texnoloji dayanıqlığını artırır.

### *İstifadə edilmiş ədəbiyyat:*

1. Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly Detection: A Survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 41(3), 1–58.
2. Bishop, C.M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, New York.
3. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
4. Aggarwal, C.C. (2017). *Outlier Analysis*. Springer, Cham.
5. Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.
6. Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines*. Pearson.
7. Alpaydin, E. (2020). *Introduction to Machine Learning*. MIT Press.
8. Ghahramani, Z. (2015). Probabilistic Machine Learning and Artificial Intelligence. *Nature*, 521, 452–459.
9. Domingos, P. (2012). A Few Useful Things to Know About Machine Learning. *Communications of the ACM*, 55(10), 78–87.
10. Laskov, P., & Rieck, K. (2014). Machine Learning Methods for Anomaly Detection. In: *Computational Intelligence in Security for Information Systems*, Springer.
11. Kaur, H., & Bhatia, M.P.S. (2020). Machine Learning and Deep Learning Approaches for Anomaly Detection in Smart Grids. *IEEE Access*, 8, 208169–208192.
12. Wang, Z., & Wang, Q. (2021). Deep Learning–Based Anomaly Detection for Smart Grid Cybersecurity. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(4), 3215–3224.
13. Amin, M. (2011). *Smart Grid Security, Privacy, and Economics*. IEEE Power and Energy Society, Wiley.
14. Zheng, J., Fan, X., & Huang, D. (2017). Anomaly Detection for Smart Grids Based on Principal Component Analysis and Extreme Learning Machine. *Energies*, 10(5), 623.
15. Khan, L., Awad, M., & Thuraisingham, B. (2007). A New Framework for Anomaly Detection in Data Mining. *IEEE International Conference on Data Mining Workshops*, 315–319.

**T.T.Sufanzade**

*doctoral student, Odlar Yurdu University*

### **Detection of anomalous behavior in energy consumption using intelligent algorithms**

#### **Abstract**

*The increasing complexity of modern energy systems and the growth in energy consumption have made the effective analysis of energy data a strategic necessity. The rapid digitalization of the energy sector and rising consumption volumes have made accurate and real-time data analysis essential. Timely identification of anomalous behavior in energy consumption is crucial for preventing technical failures, reducing energy losses, detecting illegal interventions, and strengthening energy security. Traditional statistical approaches often face limitations when dealing with large and complex datasets, which has led to the widespread adoption of intelligent algorithms in recent years.*

*This paper provides a comprehensive analysis of the theoretical and practical aspects of using soft computing methods, such as artificial neural networks, fuzzy logic, machine learning, and hybrid models, for anomaly detection in energy consumption systems. Within the framework of this research, a multi-level intelligent model is proposed, and its application benefits and potential risks are evaluated. The study demonstrates that intelligent approaches can significantly contribute to optimizing energy management, automating decision-making processes, and formulating sustainable energy strategies.*

**Keywords:** *energy consumption, anomaly detection, soft computing, artificial intelligence, machine learning.*