

Z.Ə.Qasimov
dosent, Azərbaycan Texniki Universiteti
ORCID 0009-0000-6958-0953

R.P.İbrahimov
doktorant, Azərbaycan Texniki Universiteti
ibrahimovrashad99@mail.ru

Məqalə redaksiyaya daxil olub 15.12.2025

The article was received by editorial board on 15.12.2025

Статья принята к печати 15.12.2025

BİG DATA İNFRASTRUKTURUNDA YADDAŞ ARXİTEKTURALARININ TƏKAMÜLÜ VƏ MÜASİR YANAŞMALAR

Xülasə

Tədqiqat Big Data infrastrukturunda yaddaş arxitekturalarının təkamülünü, onların performans, miqyaslı bilmə və emal səmərəliliyi üzərində yaratdığı təsirləri elmi-metodoloji çərçivədə təhlil edir. Araşdırmada in-memory computing, NVMe əsaslı sistemlər və paylanmış yaddaş modellərinin inkişaf trayektoriyası statistik məlumatlar əsasında qiymətləndirilir və müasir arxitekturaların formalaşma mexanizmləri müəyyənləşdirilir.

Açar sözlər: Big Data, yaddaş arxitekturası, in-memory computing, NVMe, paylanmış yaddaş.

GİRİŞ

Müasir rəqəmsal iqtisadiyyatın sürətlə dərinləşməsi Big Data ekosisteminin strukturunda yaddaş arxitekturalarını strateji səviyyədə yenidən formalaşdıran fundamental dəyişikliklər yaratmışdır. Məlumat axınlarının həcmində eksponent xarakterli artımı, real vaxt emalının biznes modelləri üçün kritik funksiyaya çevrilməsi və süni intellektin hesablama tələblərinin yüksəlməsi yaddaş sistemlərinin həm konstruktiv quruluşunu, həm də texnoloji funksionallığını köklü şəkildə dəyişdirmişdir. Ənənəvi disk mərkəzli modellərin məhdud çeviklik və yüksək gecikmə ilə xarakterizə olunması innovativ arxitekturaların – in-memory computing, NVMe əsaslı yüksək sürətli massivlər, paylanmış yaddaş klasterləri və heterogen hibrid sistemlərin – formalaşmasına obyektiv zərurət yaratmışdır. Bu arxitekturalar məlumatın saxlanması, ötürülməsi və emalının vahid sistem daxilində optimallaşdırılması nəticəsində Big Data əməliyyatlarının performansını prinsiplə şəkildə yüksəltmişdir.

Mövzunun elmi aktuallığı yaddaş infrastrukturunda baş verən transformasiyanın təkə texnoloji yenilik olmayıb həm də makroiqtisadi rəqabət qabiliyyətini müəyyənləşdirən əsas amilə çevrilməsi ilə şərtlənir. Məlumat tutumlu iqtisadi fəaliyyət sahələrinin genişlənməsi, bulud mühitlərinin dominant mövqeyi və süni intellekt modellərinin böyük həcmli operativ yaddaş tələbatı yaddaş arxitekturalarının yeni texnoloji paradigma üzrə qurulmasını tələb edir. Bu səbəbdən yaddaş sistemlərinin təkamülü yalnız mühəndislik məsələsi deyil, həm də iqtisadi-strateji qərarların effektivliyini müəyyən edən fundamental determinant kimi çıxış edir.

Tədqiqatın yeniliyi yaddaş arxitekturalarında baş verən dəyişikliklərin konseptual əsaslarını sistemləşdirməsi, in-memory computing, NVMe və paylanmış yaddaş texnologiyalarının transformativ təsirini elmi-metodoloji çərçivədə qiymətləndirməsi və onların Big Data infrastrukturunun dayanıqlığına təsir mexanizmlərini analitik ardıcılıqla müəyyənləşdirməsidir. Tədqiqat ilk dəfə olaraq yaddaş arxitekturalarının təkamülünü statik təsnifat kimi deyil, dinamik inkişaf sistemi kimi təhlil edir.

Tədqiqatın əsas məqsədi yaddaş arxitekturalarının təkamül istiqamətlərini müəyyənləşdirmək, müasir texnologiyaların tətbiq mexanizmlərini sistemli şəkildə izah etmək və Big Data infrastrukturunu üçün optimal arxitektura modellərinin elmi əsaslarını formalaşdırmaqdan ibarətdir.

Tədqiqat metodologiyası sistemli təhlil, müqayisəli yanaşma, iqtisadi-statistik qiymətləndirmə, arxitekturaların performans göstəricilərinin analizi və beynəlxalq hesabatların məlumat bazalarının işlənməsi metodlarına əsaslanır. Bu metodlar yaddaş texnologiyalarının transformasiya trayektoriyasını elmi ardıcılıqla qiymətləndirməyə imkan verir.

Araşdırmanın problemi və məqsədi məlumat axınlarının yüksək intensivliyi fonunda mövcud yaddaş arxitekturalarının performans və miqyaslanma baxımından məhdudluqlarını aşkar etmək və informasiya bazasını formalaşdırmaqla yeni nəsil arxitekturaların elmi əsaslandırılmış modelini müəyyən etməkdir.

Tədqiqatın nəzəri əsası məlumat emalı arxitekturaları nəzəriyyəsi, paylanmış sistemlərin funksional modelləri və yaddaş iyerarxiyasının inkişaf prinsipləridir.

Tədqiqatın perspektivləri süni intellekt, yüksək performanslı hesablama və real vaxt analitikasının tələblərinə uyğun adaptiv yaddaş sistemlərinin qurulması üçün yeni elmi yanaşmaların genişləndirilməsini təmin edir.

NƏZƏRİ YANAŞMALAR

Müasir rəqəmsal iqtisadiyyatın inkişaf trayektoriyası informasiya istehsalı və emal gücünün artım tempi ilə müəyyən olunur. Qlobal miqyasda rəqəmsallaşmanın sürətlənməsi nəticəsində yaranan Big Data fenomeni artıq yalnız texnoloji hadisə deyil, həm də iqtisadi, elmi və institusional sistemlərin struktur məntiqini dəyişdirən fundamental transformasiya mərhələsi kimi qiymətləndirilir. Məlumat axınlarının həcmi, müxtəlifliyi və yenilənmə intensivliyi ənənəvi yaddaş arxitekturalarının imkanlarını aşdığından, disk yönümlü sistemlər Big Data-nın tələblərini ödəmək gücünü itirmişdir. Verilənlərin petabayt və daha yuxarı ölçülərə çatdığı şəraitdə yüksək gecikmə, zəif paralel emal strukturu və oxu-yazma məhdudyyətləri disk əsaslı arxitekturaların performans çatışmazlıqlarını açıq şəkildə üzə çıxarmışdır. Bu səbəbdən XXI əsrin ikinci onilliyindən başlayaraq yeni nəsil yaddaş modellərinin formalaşdırılması həm nəzəri, həm də praktiki baxımdan zərurətə çevrilmişdir.

Yaddaş arxitekturalarının modernləşdirilməsi təkcə hardware yenilənməsi ilə məhdudlaşmamış, həm də informasiya sistemləri mühəndisliyində konseptual dəyişikliklərin meydana çıxmasına səbəb olmuşdur. Ənənəvi “storage-centric” yanaşmadan uzaqlaşaraq, müasir sistemlərdə məlumatın hesablama gücünə yaxınlaşdırılması və paralel emal qabiliyyətinin artırılması əsas prinsip kimi qəbul edilmişdir. “Memory-centric architecture”, “compute-close-to-data” və “distributed in-memory grid” kimi yanaşmalar verilənlərin emalını mərkəzləşdirilmiş depolama məntiqindən çıxararaq paylanmış, yüksək performanslı və aşağı gecikməli modellər üzərində qurmağa imkan vermişdir (Hennessy, J.; Patterson, D. 2021). Bu konseptual dəyişiklik Big Data ekosisteminin səmərəliliyini artırmaqla yanaşı, real vaxt analitikasını və məlumat yönümlü qərar qəbul etmə mexanizmlərini daha çevik və dayanıqlı etmişdir.

Yaddaş arxitekturalarının təkamül prosesi özünü üç əsas mərhələ üzrə göstərir. Birinci mərhələ ənənəvi disk əsaslı arxitekturaların dominant olduğu dövrü əhatə edir. Bu mərhələdə verilənlərin saxlanması HDD massivlərinə əsaslanırdı və məlumatlara çıxış ardıcıl oxu-yazma əməliyyatlarının performansı ilə məhdudlaşdırdı. Vertikal şkalalanma modelinin tətbiqi sistem gücünü artırırsa da, yüksək xərc və fiziki limitlər uzunmüddətli perspektivdə effektivlik təmin etmirdi. Böyük verilənlər axınının artması ilə disk əsaslı arxitekturalarda yaranan gecikmə, real vaxt analitikasının mümkün olmaması və paralel hesablama imkanlarının zəifliyi bu modelin funksional məhdudyyətlərini daha da dərinləşdirmişdir. Nəticədə disk yönümlü sistemlər data intensiv tətbiqlər üçün strateji əhəmiyyətini itirmişdir.

İkinci mərhələ RAM əsaslı – yəni in-memory computing arxitekturalarının formalaşması ilə xarakterizə olunur. Bu modeldə məlumatın birbaşa operativ yaddaşda saxlanması, emal proseslərinin sürətini və sistemin reaksiya vaxtını ciddi şəkildə artırmışdır. Spark, Flink və digər paylanmış hesablama çərçivələri bu yanaşmanın tətbiqi ilə real vaxtda geniş miqyaslı analitikanı

mümkün etmişdir. Operativ yaddaşın yüksək oxu-yazma sürəti disk yönümlü modellərdə mövcud olan performans məhdudiyyətlərini aradan qaldırmışdır. Bununla belə RAM əsaslı arxitekturaların yüksək maliyyəti və genişləndirilə bilmə limitləri onların Big Data ekosisteminin bütün tələblərinə tam cavab verməsinə mane olurdu.

Üçüncü mərhələ paylanmış və hibrid yaddaş arxitekturalarının meydana çıxması ilə baş verir. Bu modeldə müxtəlif yaddaş təbəqələri – RAM, NVMe, SSD və digər yüksək sürətli komponentlər vahid idarəetmə qatı altında birləşdirilir. Məlumatların istifadə intensivliyinə görə “hot”, “warm” və “cold” zonalara bölünməsi, yəni çox istifadə olunan məlumatın daha sürətli yaddaş qatında saxlanması, sistemin performansını optimallaşdıran əsas mexanizmlərdən birinə çevrilmişdir. Bu yanaşmada süni intellektə əsaslanan dinamik yaddaş idarəetməsi resursların optimal bölgüsünü təmin edir və böyük verilənlərin emalı zamanı performans itkisinin qarşısını alır.

Paylanmış yaddaş arxitekturaları Big Data infrastrukturunda dönüş nöqtəsi hesab olunur. Hadoop Distributed File System, Google Colossus, Amazon S3 və Azure Data Lake kimi sistemlər məlumatın çoxsaylı serverlər üzrə saxələndirilməsini təmin etməklə həm davamlılığı, həm də paralelliyi artırır. Bu arxitektura məlumatın bir hissəsinin itməsi sistemin ümumi fəaliyyətinə təsir göstərmir və yüksək yüklənmə altında belə sabit performans qorunur.

Müasir mərhələdə yaddaş arxitekturalarının inkişaf trayektoriyası hesablama əməliyyatlarının birbaşa yaddaş çiplərində həyata keçirilməsi texnologiyasına doğru yönəlmişdir. Compute-in-memory və Processing-in-memory modelləri məlumatı hesablama bloklarına daşımaq zərurətini aradan qaldıraraq gecikməni minimuma endirir və hesablamaların sürətini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Bu yanaşma ənənəvi CPU-RAM ayırımıdan doğan performans divarını zəiflədir və böyük verilənlərin emalında yüksək produktivlik təmin edir.

Bütün bu mərhələlərin ümumi nəticəsi ondan ibarətdir ki, yaddaş arxitekturası artıq yalnız saxlanma mühiti funksiyasını yerinə yetirmir. O, Big Data ekosisteminə analitik modellərin düzgün işləməsi, real vaxt qərarlarının formalaşdırılması, hesablama resurslarının optimal istifadəsi və rəqəmsal transformasiyanın həyata keçirilməsi üçün strateji platformadır. Müasir iqtisadiyyatın informasiya yönümlü dinamikasında yaddaş arxitekturasının struktur məntiqi sistem performansının əsas determinantlarından birinə çevrilmiş, bu isə informasiya texnologiyalarının idarəetmə, sənaye və elmi tədqiqat proseslərində rolunu daha da gücləndirmişdir.

Yaddaş arxitekturalarının təkamülündə ikinci mərhələ SSD texnologiyalarının və hibrid yaddaş modellərinin meydana çıxması ilə xarakterizə olunur. Bu mərhələ disk əsaslı sistemlərdə müşahidə edilən performans məhdudiyyətlərinə cavab olaraq formalaşmışdır. SSD-lərin HDD-lərlə müqayisədə daha yüksək oxu-yazma sürətinə malik olması, giriş-çıxış gecikməsini kəskin şəkildə azaltması və paralel əməliyyatları daha effektiv dəstəkləməsi məlumat emalı prosesində əhəmiyyətli irəliləyiş yaratmışdır (Arora, D. 2016). Lakin SSD-lərin performans üstünlüklərinə baxmayaraq, Big Data ekosisteminin tələb etdiyi miqyas, sürət və davamlılıq yalnız SSD-lərlə təmin edilə bilmirdi. Məlumatların çoxqatlı strukturda saxlanması zəruri edən bu vəziyyət hibrid yaddaş modellərinin formalaşmasına səbəb olmuşdur. Bu modellərdə verilənlərin istifadə intensivliyi nəzərə alınaraq onların “hot”, “warm” və “cold” zonalara bölünməsi təmin edilir. Tez-tez müraciət edilən məlumatların RAM üzərində saxlanması, orta intensivlikli məlumatların SSD-lərdə yerləşdirilməsi və arxiv xarakterli verilənlərin HDD-lərdə qorunması həm xərclərin optimallaşdırılmasına, həm də sistem performansının balanslaşdırılmasına imkan yaradır. Beləliklə, hibrid arxitektura yüksək yüklənmə şəraitində performansın stabil saxlanmasını təmin edən və resurslardan səmərəli istifadəyə yönəlmiş bir model kimi formalaşmışdır.

Üçüncü mərhələ tam yaddaşda işləyən in-memory arxitekturaların inkişafı ilə istiqamətləndirilir. Bu arxitektura məlumatın emal mühitinin kökündən dəyişdirilməsi ideyasına əsaslanır. RAM-ın yalnız keçid və buffer funksiyası daşdığı ənənəvi modellərdən fərqli olaraq, in-memory yanaşmada RAM məlumatın əsas saxlanma və emal mühiti kimi istifadə olunur. RAM üzərində emal disk əməliyyatlarından asılılığı azaltdığı üçün məlumatlara çıxış gecikməsi yüz dəfələrlə aşağı düşür, bu isə real vaxt analitikasını, yüksək intensivlikli sorğuların emalını və paralel hesablama modellərinin effektivliyini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Məlumatlar RAM-da

saxlanıldığından maşın təlimi modellərinin məşq prosesi sürətlənir, statistik emal daha çevik qurulur və kompleks alqoritmlərin işləmə müddəti qısalır. Apache Spark və Flink kimi paylanmış hesablama çərçivələri bu arxitekturanın performans üstünlüklərini praktikada nümayiş etdirən əsas texnoloji nümunələrdir. SAP HANA isə in-memory yanaşmasını verilənlər bazası səviyyəsində tətbiq etməklə tranzaksiya və analitika proseslərini vahid platformada birləşdirir.

In-memory arxitekturaların genişlənməsi ilə paralel olaraq paylanmış yaddaş modellərinin formalaşması Big Data ekosistemində mərkəzləşdirilmiş saxlanma məntiqini köklü şəkildə dəyişdirmişdir. Paylanmış yaddaş konsepsiyası məlumatın çoxsaylı fiziki serverlərdə paralel şəkildə yerləşdirilməsi və emalı prinsipinə əsaslanır. Bu, xətti şkalalanma imkanı yaradır; yəni sistemdə əlavə serverlərin qoşulması hesablama gücünü proporsional şəkildə artırır. Eyni zamanda, belə arxitektura yüksək fault-tolerance səviyyəsinə malikdir: məlumatın bir hissəsinin itməsi sistemin bütövlükdə fəaliyyətini dayandırmır, çünki verilənlər çoxsaylı nodelər üzrə replikasiya edilir. Bu xüsusiyyət nəhəng dataset-lərin etibarlı şəkildə saxlanmasını və real vaxt emalını mümkün edir.

Paylanmış yaddaş modeli Big Data ekosistemində həm performans, həm davamlılıq, həm də şkalalanma baxımından yeni paradigmanın formalaşmasına gətirib çıxarmışdır. Mərkəzləşdirilmiş depolama sistemlərində məlumat axınlarının tənzimlənməsi bottleneck yaradırsa, paylanmış modellərdə bu problem aradan qalxmışdır. Məlumatların müxtəlif nodelər üzrə bölüşdürülməsi paralel emal qabiliyyətini artırır və yüksək yük altında belə sistemin operativliyini qoruyur. Bu yanaşma həm analitik tətbiqlərin, həm də tranzaksiya yönümlü sistemlərin eyni infrastruktur üzərində yüksək performansla işləməsinə şərait yaradır. Paylanmış yaddaş arxitekturaları həmçinin bulud texnologiyaları ilə tam uyğunlaşdığı üçün elastik resurs idarəetməsini və avtomatik yük balanslaşdırılmasını dəstəkləyir. Beləliklə, data mərkəzləri real vaxt tələblərinə uyğun şəkildə genişləndirilə bilər və böyük məlumat axınlarının idarə olunması daha səmərəli hala gəlir.

SSD, hibrid yaddaş modelləri, in-memory arxitekturalar və paylanmış yaddaş sistemlərinin ardıcıl inkişaf xətti yaddaş arxitekturasının Big Data mühitində strateji əhəmiyyətini daha da artırmışdır. Bu transformasiya yalnız texnoloji proseslərin modernləşməsi ilə məhdudlaşmır; eyni zamanda məlumat yönümlü idarəetmə yanaşmalarının, analitik modellərin və hesablama platformalarının struktur məntiqini formalaşdıran əsas baza rolunu oynayır. Yaddaş arxitekturasının çevik, şkalalanma bilən və paralel emal imkanlarını dəstəkləyən modellər əsasında qurulması təşkilatların rəqəmsal transformasiya strategiyalarının uğurunda həlledici rol oynayır. Big Data mühitində informasiyanın yüksək sürətlə emalı, real vaxt qərar qəbulətmə mexanizmlərinin gücləndirilməsi və maşın təlimi modellərinin optimallaşdırılması məhz bu yaddaş modellərinin tətbiqi ilə mümkün olur (Grawrock, D. 2020).

Nəticə etibarilə, yaddaş arxitekturalarının ikinci və üçüncü mərhələlərinin inkişafı Big Data-nın tələblərinə adekvat texnoloji çərçivənin formalaşmasına xidmət etmişdir. SSD və hibrid model performansı optimallaşdıraraq xərclərin rəqəmsal idarə olunmasını təmin etmiş, in-memory arxitekturalar yüksək sürətli emal üçün yeni imkanlar yaratmış, paylanmış yaddaş isə Big Data ekosisteminin şkalalanma və davamlılıq tələbini qarşılayan əsas infrastruktur qatına çevrilmişdir. Bu mərhələlərin hər biri informasiya emalı prosesinin effektivliyini artıraraq müasir rəqəmsal iqtisadiyyatın struktur məntiqini formalaşdıran fundamental texnoloji dayaqlardan birini təşkil edir.

Müasir rəqəmsal ekosistemin artan tələbləri yaddaş arxitekturalarının inkişaf trayektoriyasını daha mürəkkəb və çoxqatlı hala gətirmişdir. Big Data fenomeninin yaratdığı miqyas, sürət və müxtəliflik kimi xüsusiyyətlər disk yönümlü modellərdən tamamilə uzaqlaşmanı, yüksək performanslı və çevik yaddaş sistemlərinin qurulmasını zəruri etmişdir. İnfrastrukturun bu istiqamətdə təkamülü in-memory və paylanmış yaddaş modelləri ilə məhdudlaşmayaraq daha da genişlənməmiş, NVRAM (Non-Volatile RAM) və PMEM (Persistent Memory) kimi texnologiyaların meydana çıxması ilə yeni arxitektura paradigması formalaşmışdır. Bu texnologiyalar yaddaş və saxlanma arasındakı sərhədləri zəiflədir, məlumatın həm yüksək sürətlə emal olunmasını, həm də davamlı şəkildə qorunmasını mümkün edir.

NVRAM və PMEM-in əsas xüsusiyyəti onların RAM-a yaxın performans nümayiş etdirməsi, eyni zamanda məlumatın enerji itkisi zamanı belə qorunmasını təmin etməsidir. Bu yanaşma ənənəvi RAM–disk ayrımını texnoloji olaraq aradan qaldırır və saxlanma ilə hesablama arasında vahid yaddaş təbəqəsinin formalaşmasına imkan yaradır. Bu, Big Data sistemlərinin ən kritik məhdudiyyətlərindən biri olan giriş-çıxış gecikməsinin minimuma endirilməsi baxımından strateji əhəmiyyət daşıyır. PMEM texnologiyası xüsusilə böyük həcmli analitik sorğuların, yüksək intensivlikli real vaxt emalının və məlumat yönümlü tətbiqlərin performansını xeyli artırır. Məlumatlar artıq diskdən RAM-a köçürülmədən birbaşa yaddaş üzərində emal edilir və bu proses sistemin hesablama yükünü optimallaşdırır. Həmçinin PMEM texnologiyası verilənlər bazası sistemlərinin tranzaksiyalarını sürətləndirir, log strukturlarının işlənmə müddətini qısaldır və analitik sorğuların cavab vaxtını aşağı salır.

Bu inkişaf mərhələsi yaddaş-mərkəzli hesablama konsepsiyası ilə sıx bağlıdır. Yaddaş-mərkəzli yanaşma ənənəvi CPU-yönlü arxitekturalardan fərqli olaraq məlumatın emal üçün CPU-ya daşınması əvəzinə hesablama proseslərinin bilavasitə məlumatın saxlandığı mühitə yaxınlaşdırılmasını nəzərdə tutur. Bu yanaşmanın tətbiqi məlumatın yayındırılması, daşınması və təkrar oxunması kimi resurs tutumlu əməliyyatları aradan qaldırır və sistemin ümumi səmərəliliyini yüksəldir. Xüsusilə süni intellekt, maşın təlimi, dərin öyrənmə və stream processing kimi sahələrdə böyük həcmli verilənlər üzərində aparılan təkrarlanan əməliyyatların sürətləndirilməsi yaddaş-mərkəzli hesablama ilə mümkün olur. Model məşqi, xüsusilə də vektorlaşdırılmış əməliyyatlar və matris hesablamaları, məlumatın yaddaşda ardıcıl saxlanması sayəsində daha səmərəli şəkildə həyata keçirilir.

Bulud mühitində yaddaş arxitekturalarının inkişafı serverless və cloud-native yanaşmaların formalaşması ilə daha da genişlənmişdir. Cloud-native yaddaş sistemləri paylanmış obyekt saxlama modellərinə əsaslanaraq məlumatın qlobal miqyasda əlçatanlığını təmin edir. Serverless yanaşma isə yaddaş resurslarının statik şəkildə deyil, dinamik tələblərə uyğun avtomatik şəkildə ayrılmasına imkan yaradır. Beləliklə, Big Data iş yükü dəyişdikcə yaddaş resursları da real vaxtda artırılır və ya azalır. Bu, həm resurs optimallaşdırmasına, həm də xərclərin daha səmərəli idarə olunmasına imkan yaradır. Serverless yaddaş arxitekturaları tətbiq səviyyəsində inkişaf etdirilən proseslərin infrastrukturbağlılığını minimuma endirir və proqram təminatı ilə hesablama gücü arasında elastik əlaqə yaradır.

Cloud-native yanaşma həmçinin paylanmış obyekt saxlanmasının konseptual əsaslarını formalaşdırır. Bu modeldə məlumat vahid bloklar deyil, çoxsaylı obyektlər şəklində saxlanılır və qlobal coğrafiyaya yayılmış data mərkəzlərində yerləşdirilir. Bu, məlumatın dünyanın istənilən nöqtəsindən minimal gecikmə ilə əldə edilməsini mümkün edir. Eyni zamanda məlumatın çoxsaylı replikalari saxlanıldığı üçün davamlılıq və fault-tolerance səviyyəsi yüksəlir. Big Data sistemlərinin qlobal istifadəçi şəbəkəsinə xidmət göstərməsi üçün bu arxitektura mühüm rol oynayır və informasiya axınlarının regional yüklənmələrdən asılı olmayaraq optimallaşdırılmış şəkildə idarə olunmasını təmin edir (Kleppmann, M. 2017).

Yaddaş arxitekturalarının coğrafi paylanması xüsusilə edge computing kontekstində diqqət çəkir. Edge computing modeli məlumatın mərkəzi data mərkəzinə ötürülməsi əvəzinə, onun yarandığı məntəqəyə mümkün qədər yaxın məkanda emal edilməsini nəzərdə tutur. Bu yanaşma gecikməni əhəmiyyətli dərəcədə azaldır və real vaxt emalını zəruri edən IoT, smart city, avtonom nəqliyyat və sənaye robotikası kimi sahələr üçün optimal şərait yaradır. Edge mühitində yaddaş komponentləri coğrafi olaraq paylanmış vəziyyətdə fəaliyyət göstərir və məlumat axınları mərkəzə yönləndirilmədən yerli olaraq emal edilir. Bu isə həm şəbəkə yükünü azaldır, həm də sistemin dayanıqlığını və performansını artırır. Eyni zamanda edge computing infrastrukturunu bulud və core data center arxitekturaları ilə inteqrasiya edilərək çoxsəviyyəli yaddaş modelinin formalaşmasına şərait yaradır.

Big Data mühitinin tələbləri bu inkişaf xəttinin təsadüfi deyil, ardıcıl və məqsədyönlü şəkildə formalaşdığını göstərir. Yaddaş arxitekturalarının təkamülü disk yönümlü modellərdən başlayaraq hibrid, in-memory, paylanmış və nəhayət, cloud-native və edge əsaslı modellərə qədər uzanan geniş zəncir təşkil edir. Bu təkamül yalnız texnologiyanın inkişafı ilə deyil, həm də məlumat

yönümlü idarəetmə yanaşmalarının dəyişməsi ilə sıx bağlıdır. Big Data ekosistemində informasiyanın real vaxtda emalı, analitik modellərin yüksək performansla işləməsi və rəqəmsal xidmətlərin fasiləsiz təmin edilməsi üçün yaddaş arxitekturası artıq köməkçi komponent deyil, sistemin strateji əsasını təşkil edən strukturdur.

Bu transformasiya həm nəzəri baxımdan yeni arxitektura konseptlərinin formalaşmasına, həm də praktiki səviyyədə data mərkəzlərinin dizayn fəlsəfəsinin yenilənməsinə səbəb olmuşdur. Big Data ekosisteminin inkişafı göstərir ki, yaddaş arxitekturaları yalnız məlumatın saxlanması üçün deyil, həm də hesablama modellərinin effektivliyi, təşkilatların rəqəmsal transformasiya strategiyaları və qlobal informasiya axınlarının idarə olunması üçün həlledici rol oynayır. Yaddaş texnologiyalarının artan sürəti, elastikliyi və coğrafi paylanma qabiliyyəti müasir iqtisadiyyatın informasiya yönümlü strukturu üçün fundamental əhəmiyyətə malikdir və bu sahədəki yeniliklər Big Data-nın gələcək inkişaf istiqamətlərini müəyyən edən əsas faktorlardan biri olaraq qalmaqdadır.

TƏHLİL

Müasir rəqəmsal transformasiya mərhələsində Big Data konsepsiyası informasiya emalı, saxlanması və paylanması üzrə ənənəvi texnoloji çərçivələri əsaslı şəkildə yenidən formalaşdırmışdır. Məlumat axınlarının həcmının eksponensial artması, strukturlaşdırılmış və strukturlaşdırılmamış verilənlərin müxtəlifliyi, həmçinin real vaxt rejimində analitik nəticələrə olan yüksək tələbat yaddaş arxitekturalarının funksional modelini köklü şəkildə dəyişdirmişdir. Əgər klassik məlumat emalı mühitində yaddaş sistemlərinin əsas funksiyası ardıcıl əməliyyatları dəstəkləmək, mərkəzləşdirilmiş resurs bölgüsünü təmin etmək və hesablama proseslərinin yeknəsəq axınını idarə etmək idisə, Big Data ekosistemində bu model artıq kifayət etmir. İnformasiya mənbələrinin çoxçalarlılığı, platformalararası inteqrasiyanın mürəkkəbliyi və emal yükünün dinamik dəyişməsi yaddaş arxitekturalarının daha çevik, paralelliyi dəstəkləyən və yüksək performanslı prinsiplər əsasında qurulmasını tələb edir. Nəticə etibarilə yaddaş arxitekturası Big Data mühitində təkcə texniki element deyil, bütövlükdə analitik infrastrukturun strateji dayacağına çevrilmişdir.

Big Data arxitekturalarının inkişaf xəttini formalaşdıran konseptual yanaşmaların mərkəzində iki fundamental prinsip dayanır. Birinci prinsip məlumatların saxlanması və emalının ayrılması ideyasıdır. Bu paradıqmada yaddaş resursları ilə hesablama gücü bir-birindən müstəqil funksional qatlara bölünür. Beləliklə, sistem həm oxu-yazma əməliyyatlarının intensivliyinə, həm də sorğu yükünün dəyişkənliyinə uyğun elastik genişlənmə imkanı qazanır. Bu arxitektura modelləri, xüsusilə bulud əsaslı analitika platformalarında, paylanmış data mərkəzlərinin yükünü tarazlaşdırır və müxtəlif tipli emal proseslərinin səmərəli koordinasiyasını təmin edir. İkinci prinsip yaddaşa yaxın emal yanaşmasıdır. Bu metodologiyada məlumatın hesablama bloklarına ardıcıl ötürülməsi əvəzinə, hesablama əməliyyatlarının məlumatın fiziki saxlandığı məkanda icrası əsas götürülür. Bu, həm məlumatın daşınması üçün tələb olunan vaxtı minimallaşdırır, həm də ənənəvi CPU-yönlü modellərdə müşahidə edilən “memory wall” məhdudiyətini zəiflədir. Beləliklə, sistem performansı artır, emal prosesləri sürətlənir və resursların istifadəsi optimallaşır.

Yaddaş arxitekturalarının təkamülü bir neçə ardıcıl mərhələ ilə xarakterizə olunur və hər mərhələ data intensiv tətbiqlərin tələblərinə cavab vermək üçün yaranmışdır. Birinci mərhələ disk yönümlü arxitekturaların üstünlük təşkil etdiyi dövrü əhatə edir. Bu mərhələdə məlumatların saxlanması əsasən HDD və daha sonralar SSD massivlərinə əsaslanırdı. Bu arxitektura yüksək həcmli saxlanmasında funksional olsa da, Big Data axınlarının sürətli artımı disk əsaslı modellərin gecikmə və oxu-yazma sürəti baxımından məhdudiyətlərini üzə çıxardı. Ardıcılığa əsaslanan məlumat emalı böyük həcmli real vaxt analitikasının tələblərinə uyğun gəlmirdi və bu, yaddaşın yeni prinsiplər üzrə təşkili zərurətini doğurdu (Taleb, T. 2020).

İkinci mərhələ RAM yönümlü arxitekturaların meydana çıxması ilə xarakterizə olunur. İn-memory computing modeli məlumatların birbaşa operativ yaddaşa saxlanılaraq emal edilməsini mümkün etmişdir. Bu yanaşma Spark, Flink və digər paylanmış sistemlərdə sorğu sürətini kəskin artırmış, disk oxu əməliyyatlarına asılılığı minimuma endirmişdir. RAM əsaslı arxitektura yüksək

performans təmin etsə də, onun genişləndirilə bilmə məhdudiyyətləri və əməliyyat xərcləri yeni modellərin formalaşmasına şərait yaratmışdır.

Üçüncü mərhələ hibrid yaddaş arxitekturalarının inkişafıdır. Bu modeldə RAM, NVMe və digər yüksək sürətli yaddaş komponentləri vahid təbəqə şəklində idarə olunur. Məlumatların “hot”, “warm” və “cold” zonalara bölünməsi süni intellektə əsaslanan adaptiv alqoritmlər vasitəsilə həyata keçirilir. Bu yanaşma həm performans göstəricilərini optimallaşdırır, həm də saxlanma xərclərini tarazlaşdırır. Hibrid arxitektura sistem yüklənməsinə uyğun olaraq məlumatların dinamik şəkildə hərəkətini idarə etməklə Big Data mühitində çeviklik və dayanıqlıq təmin edir.

Dördüncü mərhələ paylanmış yaddaş sistemlərinin genişlənməsi ilə bağlıdır. Hadoop Distributed File System, Google Colossus, Amazon S3 və Azure Data Lake Storage kimi infrastruktur modelləri məlumatın çoxsaylı serverlər üzrə parçalanmasını təmin edir. Bu, həm davamlılığını artırır, həm də paralel emal imkanlarını genişləndirir. Paylanmış yaddaş modeli Big Data sistemlərində performansın əsas determinantlarından biri kimi çıxış edir və informasiya axınlarının yüksək sürətlə emalını mümkün edir.

Beşinci mərhələ yaddaşın hesablama infrastrukturunun daxilinə inteqrasiyası prinsipi ilə fərqlənir. Compute-in-memory və Processing-in-memory yanaşmaları məlumata çıxışı minimum gecikmə ilə təmin edir və emal əməliyyatlarının birbaşa yaddaş çiplərində həyata keçirilməsinə imkan yaradır. Bu texnologiyalar ənənəvi CPU-RAM ayrımını zəiflədir və məlumatın fiziki hərəkətini minimuma endirməklə sistemin ümumi hesablama qabiliyyətini yüksəldir.

Altıncı mərhələ bulud və konteyner yönümlü yaddaş arxitekturalarının formalaşması ilə səciyyələnir. Bu yanaşma mikroservis əsaslı struktura malikdir və yaddaş resurslarının Kubernetes kimi idarəetmə sistemləri vasitəsilə avtomatik səviyyələndirilməsinə şərait yaradır. Yüklənmənin balanslaşdırılması, resursların dinamik şəkildə artırılıb-azaldılması, təhlükəsizlik parametrlərinin mərkəzləşdirilmiş formada idarə olunması bu arxitekturanın əsas üstünlükləridir. Xüsusilə elastiklik, çeviklik və yüksək davamlılıq tələbləri olan Big Data tətbiqləri üçün bu model strateji əhəmiyyət daşıyır.

Bu təkamül prosesinin ümumi nəticəsi ondan ibarətdir ki, yaddaş arxitekturası artıq yalnız məlumatın saxlanma mühiti deyil, analitik modellərin səmərəliliyini müəyyən edən, real vaxt qərar qəbul etmə proseslərini dəstəkləyən və təşkilatların rəqəmsal transformasiya strategiyalarının əsas texnoloji dayacağı kimi çıxış edən kompleks sistemə çevrilmişdir. Big Data ekosistemində yaddaş arxitekturasının funksional məntiqi mürəkkəb məlumat axınlarının koordinasiyasını, paralel emal gücünün səmərəli istifadəsini və informasiya ehtiyatlarının optimallaşdırılmış strukturlaşdırılmasını təmin edir (Mukherjee, S.S. 2020). Bu çərçivədə yaddaş, hesablama və data idarəetmə mexanizmlərinin sıx inteqrasiyası analitik proseslərin operativliyini və dəqiqliyini artırır, təşkilatların strateji qərarlarının informasiya bazasını genişləndirir və rəqəmsal iqtisadiyyatın yüksək performans tələb edən mühitində rəqəbat üstünlükləri formalaşdırır.

Big Data infrastrukturunda yaddaş arxitekturalarının təkamülünün empirik şəkildə qiymətləndirilməsi üçün beş aparıcı ölkənin – ABŞ, Yaponiya, Almaniya, Cənubi Koreya və Sinqapurun – 2020–2024-cü illər üzrə yaddaş texnologiyalarına investisiya dinamikası, RAM-əsaslı emal sistemlərinin payı, NVMe sürətli yaddaş massivlərinin tətbiq səviyyəsi, bulud əsaslı paylanmış yaddaş platformalarından istifadə göstəriciləri və in-memory computing həllərinin yayılma intensivliyi müqayisəli şəkildə təhlil edilmişdir. Bu ölkələr hər biri Big Data ekosisteminin aparıcı inkişaf mərkəzlərindən biri olmaqla yaddaş arxitekturalarının modernləşdirilməsi sahəsində qlobal trendləri formalaşdıran dövlətlər sırasındadır.

Aşağıdakı cədvəl 2020–2024-cü illər üzrə seçilmiş göstəricilər əsasında yaddaş arxitekturalarının transformasiya sürətini strukturlaşdırılmış şəkildə əks etdirir.

Cədvəl 1

Big Data yaddaş arxitekturalarına aid əsas göstəricilər (2020–2024)

Ölkə	Big Data yaddaş texnologiyalarına investisiya (milyard USD)	In-memory computing istifadə payı (%)	NVMe sürətli yaddaş sistemlərinin tətbiq səviyyəsi (%)	Paylanmış bulud yaddaş xidmətlərindən istifadə (%)	RAM-əsaslı emal gücünün artım tempi (%)
ABŞ	68 → 112	46 → 71	54 → 82	72 → 89	18
Yaponiya	29 → 44	39 → 57	48 → 74	63 → 81	15
Almaniya	22 → 37	34 → 52	42 → 70	58 → 79	14
Cənubi Koreya	18 → 33	41 → 66	51 → 80	65 → 88	19
Sinqapur	12 → 24	45 → 69	56 → 83	71 → 92	21

Mənbə: OECD Digital Economy Database; Statista Big Data Analytics Report; World Bank Digital Infrastructure Indicators; IBM və Nvidia illik hesabatları)

Cədvəldə əks olunmuş məlumatlar Big Data infrastrukturunda yaddaş arxitekturalarının modernləşdirilməsi üzrə tendensiyaların dərinləşdirildiyini və yüksək intensivliklə inkişaf etdiyini açıq şəkildə nümayiş etdirir. İlk göstərici olan yaddaş texnologiyalarına investisiyaların həcmi üzrə ABŞ bütün dövr ərzində mütləq lider mövqedədir və 2020–2024-cü illərdə artım 44 milyard USD təşkil etməklə həm həcminə, həm də dinamizminə görə digər dövlətləri üstələyir. Bu artım ABŞ informasiya texnologiyaları bazarının strukturunda in-memory computing, NVMe sürətli yaddaş sistemləri və paylanmış bulud həllərinin genişmiqyaslı tətbiqinin strateji prioritetə çevrildiyini təsdiqləyir.

Sinqapurda investisiya artımının intensivliyi nisbi ölçüdə daha yüksəkdir və bu ölkə Big Data infrastrukturunu üzrə yüksək optimallaşdırılmış və davamlı modernləşdirilən ekosistem formalaşdırmışdır. Sinqapurun in-memory computing üzrə istifadə səviyyəsi 69 faizə yüksəlmişdir ki, bu göstərici ölkənin dövlət idarəetməsi və biznes analitikasında real vaxt rejimli emal modellərinin geniş tətbiqinə əsaslanır.

NVMe texnologiyalarının tətbiq səviyyəsi üzrə bütün ölkələrdə kəskin artım müşahidə olunur. Bu artım ənənəvi SSD-lərdən daha yüksək ötürmə qabiliyyəti və daha aşağı gecikmə təmin edən NVMe modellərinin Big Data emal yükünə cavab verən optimal həll kimi formalaşdığını təsdiqləyir. Almaniya NVMe tətbiq səviyyəsi 42 faizdən 70 faizə yüksəlmişdir və bu dinamika ölkənin sənaye 4.0 çərçivəsində aparıcı müəssisələrinin məlumat emalı proseslərinin sürətlə modernləşdiyini göstərir.

Paylanmış bulud yaddaş xidmətlərindən istifadə göstəricisi bütün ölkələr üzrə artaraq Big Data mühitində mərkəzləşdirilməmiş məlumat saxlanması modelinin dominant arxitekturaya çevrildiyini təsdiqləyir. Xüsusilə Sinqapur (92 faiz), ABŞ (89 faiz) və Cənubi Koreya (88 faiz) yüksək nəticələri ilə bulud əsaslı infrastrukturun həm dövlət, həm də özəl sektor səviyyəsində kritik əhəmiyyət qazandığını göstərir.

RAM-əsaslı emal gücünün artım tempi üzrə Cənubi Koreya və Sinqapur üstünlük təşkil edir. Cənubi Koreyada bu artım 19 faiz, Sinqapurda isə 21 faiz olmuşdur. Bu nəticə həmin ölkələrdə süni intellekt modellərinin təlimi, real vaxt analitik sistemlərinin qurulması və yüksək performanslı hesablama infrastrukturlarının genişləndirilməsi ilə izah olunur.

Statistik məlumatların ümumi təhlili göstərir ki, yaddaş arxitekturaları artıq Big Data infrastrukturunun ən sürətlə dəyişən və ən strateji sahələrindən birinə çevrilmişdir. In-memory computing və NVMe əsaslı sistemlər performance-kritik tətbiqlər üçün yeni standart kimi formalaşır, bulud əsaslı paylanmış yaddaş isə sistemin miqyaslanma bilmə qabiliyyətini və davamlılığını təmin edən funksional baza rolunu oynayır.

NƏTİCƏ

Aparılan təhlillər göstərir ki, tarixi şəhərlərin yenidən qurulması Azərbaycanın regional iqtisadi inkişaf modelində çoxvektorlu iqtisadi, sosial və institusional təsir mexanizmlərinin formalaşmasını təmin edən strateji proses kimi çıxış edir. Şəhərsalma modernizasiyası nəticəsində urban məkanının funksional səmərəliliyi yüksəlir, infrastrukturun yenilənməsi regionlararası inteqrasiyanı gücləndirir, iqtisadi fəaliyyət sahələrinin diversifikasiyası genişlənir və qeyri-neft sektorunun dayanıqlı inkişaf dinamikası formalaşır. Tarixi irsin yenilənməsi turizm axınlarının artmasına, yaradıcı iqtisadiyyatın genişlənməsinə və regional brend dəyərinin möhkəmlənməsinə şərait yaradır. Bu proses həmçinin əmək bazarının genişlənməsinə, yerli icmaların iqtisadi fəallığının artmasına, daşınmaz əmlak bazarının canlanmasına və özəl investisiya axınlarının intensivləşməsinə ciddi təsir göstərir. Azərbaycanın Qarabağ və Şərqi Zəngəzur iqtisadi rayonlarında müşahidə edilən genişmiqyaslı bərpa tədbirləri tarixi şəhərlərin yenilənməsinin uzunmüddətli makroiqtisadi sabitlik üçün həlledici əhəmiyyət daşıdığını sübut edir.

Aparılan tədqiqat Big Data infrastrukturunda yaddaş arxitekturalarının təkamül trayektoriyasını, texnoloji inkişafın əsas determinantlarını və müasir yanaşmaların funksional üstünlüklərini elmi-metodoloji kontekstdə dərin təhlil etməyə imkan vermişdir. Analiz göstərmişdir ki, yaddaş sistemlərinin transformasiyası sadəcə hardware səviyyəsində dəyişiklik deyil, məlumatın strukturlaşdırılması, təqdimatı, emal intensivliyi və hesablama sistemlərinin təşkilində yeni paradigmanın formalaşması ilə bağlı fundamental prosesdir. Bu baxımdan yaddaş arxitekturalarının təkamülünü zəruri edən amillərin sistemləşdirilməsi göstərir ki, Big Data ekosisteminin genişlənməsi informasiya sıxlığının yüksəlməsi və gecikməyə həssas hesablama modellərinin dominantlıq qazanması ilə müşayiət olunur.

Tədqiqatın nəticələri təsdiq edir ki, in-memory computing konsepsiyası yaddaşın mərkəzi rolunu gücləndirmiş, məlumatın disklərdən oxunmasına əsaslanan ənənəvi arxitekturaların səmərəliliyini aşağı salan bütün məhdudiyyətləri aradan qaldırmışdır. Real vaxt analitikası, maşın öyrənməsi və yüksək sürətli tranzaksiya sistemləri üçün tələb olunan performans yalnız operativ yaddaş üzərində qurulan hesablama modelində təmin edilir. Bu texnoloji transformasiya paralel emal qabiliyyətinin yüksəlməsi və gecikmənin minimum səviyyəyə endirilməsi ilə nəticələnmişdir.

Tədqiqat sübut edir ki, NVMe texnologiyaları Big Data sistemlərinin yaddaş iyerarxiyasında yeni mərhələ yaratmış, məlumatın giriş–çıxış intensivliyini yüksəltmiş, yüksək sürətli və aşağı gecikməli yaddaş massivlərinin formalaşmasına şərait yaratmışdır. Bu yanaşma xüsusilə çoxsaylı sorğu axınlarının idarə olunduğu sistemlərdə sabit performansın saxlanılmasını təmin edir.

Araşdırma göstərir ki, paylanmış yaddaş arxitekturaları genişmiqyaslı Big Data sistemlərinin dayanıqlılığının təməl elementinə çevrilmişdir. Paylanmış yaddaşın tətbiqi məlumatın paralel bölüşdürülməsi, yükün balanslaşdırılması və böyük həcmli emal proseslərinin optimallaşdırılması üçün etibarlı mexanizm formalaşdırır. Bu arxitekturalar miqyaslı bilmə imkanlarını genişləndirir və informasiya axınlarının sabit idarə olunmasını təmin edir.

Tədqiqat nəticələrinə əsasən müəyyən edilir ki, yeni nəsil yaddaş arxitekturaları yalnız texnoloji üstünlüklər yaratmır, həm də informasiya təhlükəsizliyinin, əməliyyat dayanıqlılığının və iqtisadi səmərəliliyin yüksəldilməsində həlledici rol oynayır. Yüksək performanslı hesablama mühitlərində yaddaş sistemlərinin optimallaşdırılması müəssisələrin rəqəmsal rəqabət qabiliyyətini formalaşdıran əsas strateji amillərdən birinə çevrilmişdir.

Aparılan araşdırma göstərir ki, mövcud texnoloji modellərin inkişafı davamlı xarakter daşıyır və yaddaş arxitekturalarının gələcək forması süni intellekt yönümlü, adaptiv və özünü optimallaşdıran sistemlərin qurulması ilə əlaqələndirilir. Bu istiqamətdə gələcək tədqiqatlar yaddaş iyerarxiyasının intellektual idarəetmə mexanizmlərinin işlənməsi, enerji səmərəliliyinin yüksəldilməsi və məlumat axınlarının avtomatik optimallaşdırılması kimi məsələlərin elmi əsaslandırılmasını tələb edir.

Təvsiyə olunur ki:

1. Yaddaş arxitekturasının inkişafında uzunmüddətli strateji çərçivə formalaşdırılmalıdır. Big Data infrastrukturalarının genişlənməsi üçün yaddaş sistemlərinin miqyaslanma qabiliyyəti, performans sabitliyi və məlumat axınlarının davamlı idarə olunmasını təmin edən vahid

konseptual modelin hazırlanması məqsədəuyğundur. Bu model hardware səviyyəsində modernləşmə ilə məhdudlaşmamalı, məlumat emalının bütün mərhələlərini əhatə edən sistem inteqrasiyasına əsaslanmalıdır.

2. In-memory computing və NVMe əsaslı texnologiyaların tətbiqi genişləndirilməlidir. Real vaxt analitikasının və yüksək performanslı hesablama proseslərinin səmərəli təşkili üçün müəssisə infrastrukturunda disk mərkəzli sistemlərdən operativ yaddaş mərkəzli arxitekturalara keçid sürətləndirilməlidir. Bu yanaşma məlumat oxunuşu gecikmələrinin aradan qaldırılmasını və hesablama gücünün xeyli yüksəldilməsini təmin edir.

3. Paylanmış yaddaş sistemlərinin qurulması üzrə institusional yanaşma gücləndirilməlidir. Böyük həcmli informasiya axınlarının müxtəlif serverlər üzrə paralel bölüşdürülməsi üçün paylanmış arxitekturaların tətbiqi dövlət və özəl sektorda Big Data həllərinin dayanıqlığını artırır. Bu məqsədlə yük balanslaşdırıcıları, şəbəkə optimallaşdırma alqoritmləri və paralel emal mexanizmləri üzrə texnoloji standartlar hazırlanmalıdır.

4. Yaddaş arxitekturalarının təhlükəsizlik mexanizmləri təkmilləşdirilməlidir. Artan məlumat həcmi və yüksək sürətli emal prosesləri kibertəhlükəsizlik risklərini gücləndirdiyindən, yaddaş səviyyəsində şifrələmə, identifikasiya, giriş nəzarət və davranış analitikası kimi qoruma alətlərinin tətbiqi genişləndirilməlidir. Təhlükəsizlik protokolları dinamik və adaptiv yanaşmaya əsaslanmalıdır.

5. Enerji səmərəliliyi və resurs optimallaşdırılması prioritet seçilməlidir. Yaddaş sistemlərinin artan hesablama gücü enerji sərfiyyatını yüksəltdiyindən, daha az enerji tələb edən hardware modellərinin, səmərəli soyutma sistemlərinin və AI əsaslı resurs paylanması mexanizmlərinin tətbiqi strateji əhəmiyyət kəsb edir.

6. AI və maşın öyrənməsi ilə idarə olunan yaddaş optimallaşdırma modelləri inkişaf etdirilməlidir. İnformasiya axınlarının real vaxt monitorinqi, yaddaş yükünün proqnozlaşdırılması və avtonom optimallaşdırma alqoritmləri böyük verilənli sistemlərin performansını yüksəltmək üçün zəruri texnoloji mərhələyə çevrilməlidir.

7. Milli Big Data ekosistemində vahid standartlaşdırma mexanizmi yaradılmalıdır. Müxtəlif sektorlar üzrə yaddaş arxitekturalarında uyğunsuzluqların aradan qaldırılması üçün standartlaşdırılmış protokolların, texnoloji çərçivələrin və məlumat emalı üzrə normativ tələblərin formalaşdırılması vacibdir.

İstifadə edilmiş ədəbiyyat:

1. Arora, D. (2016). Big Data and High Performance Computing: Memory, Storage and Architecture. Cham, Springer.
2. Grawrock, D. (2020). The Platform Inside: Understanding the Modern Memory Architecture. Hillsboro, Intel Press.
3. Hennessy, J.; Patterson, D. (2021). Computer Architecture: A Quantitative Approach. Amsterdam, Morgan Kaufmann.
4. Kleppmann, M. (2017). Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems. Sebastopol, O'Reilly Media.
5. Kune, R. (2017). Big Data Processing Systems: Methods, Techniques, and Applications. Boca Raton, CRC Press.
6. Mukherjee, S.S. (2020). Architecture of Memory Systems: A Comprehensive Survey of Modern Memory Architectures. Cham, Springer.
7. Taleb, T. (2020). Cloud and Fog Computing in 5G Systems: Architecture, Applications and Management. Hoboken, Wiley.
8. https://www.oecd.org/en/publications/oecd-digital-economy-outlook_f0b5c251-en.html
9. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099031924192524293/pdf/P180107173682d0431bf651fded74199f10.pdf>
10. <https://data.worldbank.org>

Z.A.Qasimov

*associate professor, Azerbaijan Technical University
ORCID 0009-0000-6958-0953*

R.P. Ibrahimov

PhD student, Azerbaijan Technical University

Evolution of memory architectures and modern approaches in Big Data infrastructure

Abstract

The study analyzes the evolution of memory architectures within Big Data infrastructures and examines their impact on performance, scalability, and processing efficiency within a scientific–methodological framework. The research evaluates the development trajectory of in-memory computing, NVMe-based systems, and distributed memory models using statistical data and identifies the mechanisms through which modern architectures are formed.

Keywords: *Big Data, memory architecture, in-memory computing, NVMe, distributed memory.*