

EDGE INTELLIGENCE ASOSIDA IOT TIZIMLARIDA OPTIMALLASHTIRILGAN MA'LUMOTLAR TAHLILI

Gulora Razzakberdi qizi RAZZAKOVA

o'qituvchi

Muhammad al-Xorazmiy nomidagi

Toshkent Axborot texnologiyalari universiteti Urganch filiali

Urganch, O'zbekiston

razzakovag0597@gmail.com

Annotatsiya

Ushbu maqolada Internet of Things (IoT) tizimlarida Edge Intelligence texnologiyasidan foydalangan holda ma'lumotlar tahlilini optimallashtirish masalalari yoritiladi. An'anaviy bulutli hisoblash arxitekturalari yuqori tarmoq kechikishi, markazlashgan yuklama va maxfiylik muammolari bilan yuzlashayotgan bir paytda, edge darajada ma'lumotni tahlil qilish va sun'iy intellekt modellarini chekka qurilmalarga integratsiyalash samarali yechim sifatida ilgari suriladi.

Shuningdek, edge intelligence konsepsiyasi yordamida IoT qurilmalarining real vaqtda ishlashi, past kechikishli va xavfsiz qaror qabul qilish imkoniyatlari, hamda avtonom tizimlarni yaratishdagi o'rni ko'rib chiqiladi. TinyML (чекка qurilmalar uchun yengil sun'iy intellekt), 5G tarmoqlari va boshqa ilg'or texnologiyalar bilan integratsiyada edge intelligence asosida ma'lumotlar tahlilini qanday optimallashtirish mumkinligi tahlil qilinadi.

Tayanch so'zlar: Internet of Things (IoT), Edge Computing, Edge Intelligence, Sun'iy intellect, Tarmoq kechikishi, Avtonom tizimlar, TinyML, 5G texnologiyasi, Aqlli qurilmalar, Ma'lumotlarni chekka darajada qayta ishlash.

ОПТИМИЗИРОВАННАЯ АНАЛИТИКА ДАННЫХ В СИСТЕМАХ IOT НА ОСНОВЕ EDGE INTELLIGENCE

Гулора Раззакберди қизи РАЗЗАКОВА

преподаватель

Ургенчский филиал Ташкентского университета

информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми

Ургенч, Узбекистан

razzakovag0597@gmail.com

Аннотация

В данной статье рассматривается оптимизация анализа данных с использованием технологии Edge Intelligence в системах Интернета вещей (IoT). В то время как традиционные архитектуры облачных вычислений сталкиваются с высокой задержкой сети, централизованной нагрузкой и проблемами конфиденциальности, аналитика данных на уровне периферии и интеграция моделей искусственного интеллекта в периферийные устройства продвигаются как эффективные решения.

В статье рассматривается работа устройств Интернета вещей в режиме реального времени с использованием концепции периферийного интеллекта, возможности принятия решений с малой задержкой и безопасностью, а также ее роль в создании автономных систем. Также будет проанализировано, как

можно оптимизировать анализ данных на основе периферийного интеллекта в интеграции с TinyML (облегченный искусственный интеллект для периферийных устройств), сетями 5G и другими передовыми технологиями.

Ключевые слова: Интернет вещей (IoT), Периферийные вычисления, Периферийный интеллект, Искусственный интеллект, Задержка сети, Автономные системы, TinyML, Технология 5G, Умные устройства, Обработка данных на периферии.

So‘nggi yillarda Internet of Things (IoT) texnologiyalari keskin rivojlanib, turli sohalarda millionlab qurilmalarni bir-biri bilan bog‘lab qo‘ydi. Biroq, bu qurilmalardan hosil bo‘ladigan katta hajmdagi ma‘lumotni an‘anaviy bulutli hisoblash infratuzilmalari orqali qayta ishlash tarmoqga ortiqcha yuklama, kechikishlar va xavfsizlikka oid xatarlarni keltirib chiqarmoqda. Aynan shu muammolar yechimi sifatida Edge Computing va u bilan chambarchas bog‘liq bo‘lgan Edge Intelligence texnologiyalari maydonga chiqmoqda.

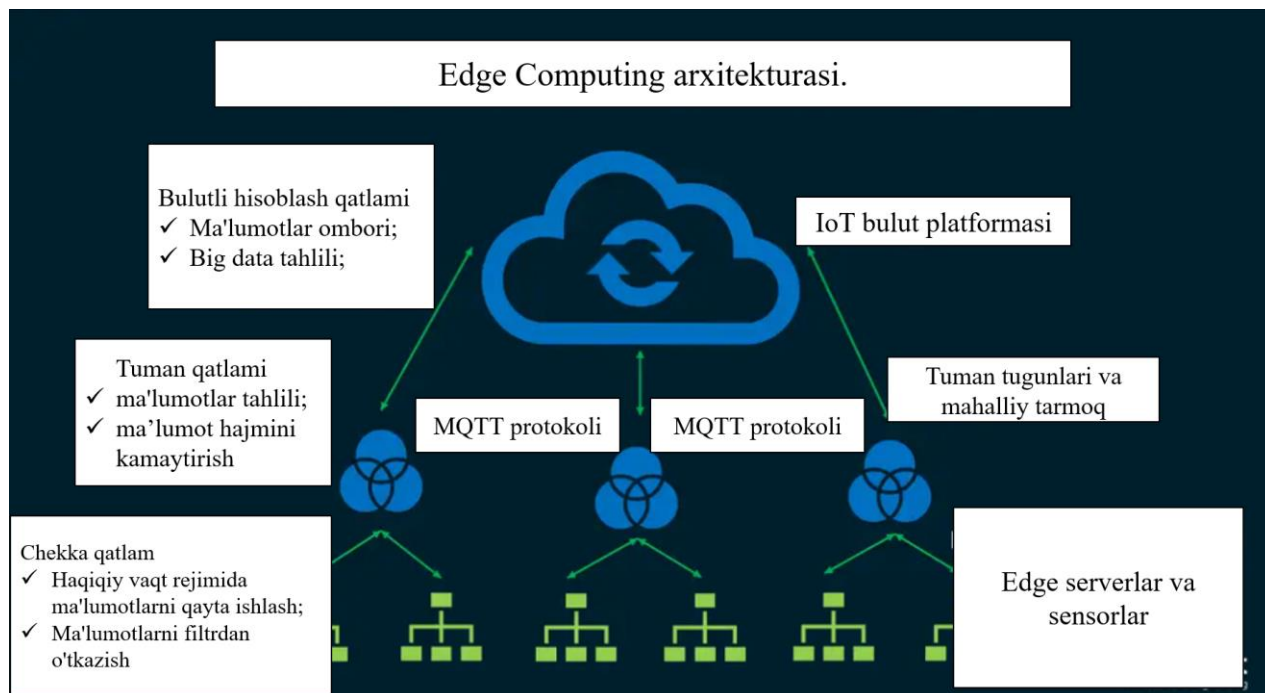
Edge Intelligence – bu sun‘iy intellekt algoritmlarini to‘g‘ridan-to‘g‘ri chekka (edge) qurilmalarda joylashtirish va ularda real vaqtda ma‘lumot tahlilini amalga oshirish imkonini beruvchi yondashuvdir. U IoT tizimlariga avtonomlik, tezkorlik va xavfsizlik kabi muhim ustunliklar bag‘ishlaydi. Mazkur matnda edge intelligence texnologiyasining IoT tizimlarida optimallashtirilgan ma‘lumotlar tahlili jarayonidagi roli, afzalliklari, amaliy qo‘llanilishi va mavjud texnik to‘siqlar keng tahlil qilinadi. Ayniqsa, TinyML va 5G texnologiyalari bilan integratsiya holatlari alohida e‘tibor markazida bo‘ladi.

Edge Computing va Edge Intelligence texnologiyalarining IoT tizimlaridagi qo‘llanilishi.

Edge computing. Bulutli hisoblash 2005-yildan beri bizning yashash, ishlash va o‘qish uslubimizni tubdan o‘zgartirdi [1]. Masalan, Google Apps, Twitter, Facebook va Flickr kabi dasturiy ta‘minotlar xizmat sifatida (SaaS) kundalik hayotimizda keng qo‘llanilgan. Bundan tashqari, kengaytiriladigan infratuzilmalar, shuningdek, bulutli xizmatni qo‘llab-quvvatlash uchun ishlab chiqilgan ishlov berish mexanizmlari ham biznes yuritish uslubiga sezilarli ta‘sir ko‘rsatmoqda, masalan, Google File System [2][3][4], Apache Spark [5] va boshqalar.

Narsalar Interneti (IoT) birinchi marta 1999 yilda ta'minot zanjirini boshqarish uchun hamjamiyatga taqdim etilgan [6], so'ngra "inson aralashuvisiz kompyuterda ma'lumotni anglash" tushunchasi sog'liqni saqlash, uy, atrof-muhit va transport kabi boshqa sohalarga keng moslashtirildi [7][8]. Endi IoT bilan biz post-bulutli davrga yetib boramiz, u erda kundalik hayotimizga singib ketgan narsalar tomonidan yaratilgan katta sifatli ma'lumotlar bo'ladi va bu ma'lumotlarni iste'mol qilish uchun ko'plab ilovalar ham chetga joylashtiriladi. 2019-yilga kelib, odamlar, mashinalar va narsalar tomonidan ishlab chiqarilgan ma'lumotlar Cisco Global Cloud Index tomonidan taxmin qilinganidek, 500 zettabaytga etadi, biroq global ma'lumotlar markazi IP-trafigining hajmi o'sha vaqtga kelib atigi 10,4 zettabaytga etadi [9] 2019-yilga kelib, IoT tomonidan yaratilgan ma'lumotlarning 45 foizi tarmoq yaqinida yoki uning chekkasida saqlanadi, qayta ishlanadi, tahlil qilinadi va amal qiladi[10]. Cisco Global Cloud Index tomonidan bashorat qilinganidek, 2020-yilga kelib Internetga 50 milliard narsa ulanadi. Ba'zi IoT ilovalari juda qisqa javob vaqtini talab qilishi mumkin, ba'zilar shaxsiy ma'lumotlarni o'z ichiga olishi mumkin va ba'zilar tarmoqlar uchun katta yuk bo'lishi mumkin bo'lgan katta hajmdagi ma'lumotlarni ishlab chiqarishi mumkin. Bulutli hisoblash ushbu ilovalarni qo'llab-quvvatlash uchun yetarli darajada samarali emas.

Bulutli xizmatlarning surish va IoT-dan tortib olinishi bilan biz tarmoqning chekkasi ma'lumotlar iste'molchisidan ma'lumot ishlab chiqaruvchisiga, shuningdek ma'lumotlar iste'molchisiga o'tishini tasavvur qilamiz. Ushbu maqolada biz chekka hisoblash tushunchasiga hissa qo'shishga harakat qilamiz. Biz chekka hisoblash nima uchun kerakligini tahlil qilishdan boshlaymiz, so'ngra chekka hisoblashning ta'rifi va tasavvurimizni beramiz. Bulutli yuklash, aqlli uy va shahar, shuningdek, hamkorlikdagi chekka kabi bir nechta amaliy tadqiqotlar chekka hisoblashni batafsil tushuntirish uchun taqdim etiladi, undan keyin dasturlash, nomlash, ma'lumotlarni abstraktsiyalash, xizmatlarni boshqarish, maxfiylik va xavfsizlik, shuningdek, kelajakda tadqiqot va o'rganishga arziydigan optimallashtirish ko'rsatkichlari bo'yicha ba'zi qiyinchiliklar va imkoniyatlar taqdim etiladi (1-rasm).



1-rasm. Edge computing arxitekturası [16].

Edge intelligence. Edge razvedkasi, hozirda o'zining dastlabki bosqichida, butun dunyodan ko'proq tadqiqotchilar va kompaniyalarni jalb qilmoqda. Keng razvedkaning songgi yutuqlarini tarqatish uchun Chjou va boshqalar. [11] chekka razvedka bo'yicha so'nggi tadqiqot harakatlarining keng qamrovli va aniq so'rovini o'tkazdilar. Ular sun'iy intellekt modellarini o'rgatish va xulosa chiqarish nuqtai nazaridan arxitekturalarni, texnologiyalarni, tizimlarni va ramkalarni o'rganadilar. Ba'zi ishlar kontsepsiyani sun'iy intellekt tomonidan boshqariladigan tumanli hisoblash nuqtai nazaridan ham o'rganadi [12]. Masalan, Peng va Chjan tuman-radio kirish tarmoqlarida (F-RAN) samaradorlikni tahlil qilish va radio resurslarini taqsimlash bo'yicha so'nggi yutuqlarni har tomonlama sarhisob qildi. Ushbu tadqiqot spektral samaradorlikni (SE) va EEni yaxshilash uchun ilg'or chekka kesh va moslashuvchan model tanlash sxemalarini taqdim etadi [13]. Mualliflar, shuningdek, F-RAN-larni tizim arxitekturası va asosiy texnikalar nuqtai nazaridan o'rganadilar, bunda ikkinchisi uzatish rejimini tanlash va shovqinlarni bostirishni o'z ichiga oladi [14]. Bundan tashqari, Mao va boshqalar. turli tarmoq qatlamlari uchun chuqur o'rganish algoritmlarini qo'llash bo'yicha zamonaviy tadqiqotlarni

o'rgandi. I-jadvalda biz chekka razvedka bo'yicha tegishli so'rov hujjatlarini umumlashtiramiz.

Edge Computing va AI o'rtasidagi aloqalar. Biz AI va chekka hisoblashning birlashishi tabiiy va muqarrar deb hisoblaymiz. Aslida, ular o'rtasida interaktiv aloqa mavjud. Bir tomondan, sun'iy intellekt chekka hisoblashni texnologiyalar va usullar bilan ta'minlaydi va chekka hisoblash AI bilan o'zining salohiyati va kengaytirilishini ochib berishi mumkin; boshqa tomondan, chekka hisoblash AI ni stsenariylar va platformalar bilan ta'minlaydi va AI chekka hisoblash bilan qo'llanilishini kengaytirishi mumkin.

AI texnologiya va usullar bilan chekka hisoblashni ta'minlaydi: Umuman olganda, chekka hisoblash – bu taqsimlangan hisoblash paradigmasi bo'lib, unda dasturiy ta'minot bilan belgilangan tarmoqlar ma'lumotlarni markazsizlashtirish va xizmatlarni mustahkamlik va elastiklik bilan ta'minlash uchun qurilgan. Edge computing turli qatlamlarda resurslarni taqsimlash muammolariga duch keladi, masalan, CPU aylanish chastotasi, kirish yurisdiksiyasi, radiochastota, tarmoqli kengligi va boshqalar. Natijada, u tizim samaradorligini oshirish uchun turli xil kuchli optimallashtirish vositalariga katta talablarga ega. AI texnologiyalari bu vazifani bajarishga qodir. Asosan, AI modellari haqiqiy stsenariylardan cheklanmagan optimallashtirish muammolarini chiqaradi va keyin SGD usullari bilan iterativ ravishda asimptotik optimal yechimlarni topadi. Statistik o'rganish usullari yoki chuqur o'rganish usullari chekka uchun yordam va maslahat berishi mumkin. Bundan tashqari, kuchaytirishni o'rganish, jumladan, ko'p qurolli bandit (MAB) nazariyasi, ko'p agentli o'rganish va chuqur Q tarmog'i (DQN), chekka uchun resurslarni taqsimlash muammolarida tobora ortib borayotgan va muhim rol o'ynamoqda.

Edge Computing AI ni stsenariylar va platformalar bilan ta'minlaydi: IoT qurilmalarining ko'payishi hamma narsaning Internetini (IoE) haqiqatga aylantiradi [15]. Ko'proq ma'lumotlar keng tarqalgan va geografik jihatdan taqsimlangan mobil va IoT qurilmalari tomonidan yaratiladi, mega-miqyosdagi bulutli ma'lumotlar markazlaridan tashqari. Aqlli tarmoqqa ulangan transport vositalari, avtonom

haydash, aqlli uy, aqlli shahar va ijtimoiy xavfsizlik sohasida real vaqtda ma'lumotlarni qayta ishlash kabi ko'plab dastur stsenariylari AIni nazariyadan amaliyotga qadar amalga oshirishni sezilarli darajada osonlashtirishi mumkin. Bundan tashqari, yuqori aloqa sifati va past hisoblash quvvatiga ega AI ilovalari bulutdan chetga ko'chirilishi mumkin. Bir so'z bilan aytganda, chekka hisoblashlar AIni boy imkoniyatlarga to'la heterojen platforma bilan ta'minlaydi. Hozirgi vaqtda asta-sekin, masalan, dalada dasturlashtiriladigan darvoza massivlari (FPGA), grafik ishlov berish birliklari (GPU), tenzor ishlov berish birliklari (TPU) va neyron ishlov berish birliklari (NPU) kabi hisoblash tezlashuviga ega AI chiplari aqlli mobil qurilmalar bilan birlashtirilishi mumkin bo'ladi. Ko'proq korporatsiyalar chekka hisoblash paradigmasini qo'llab-quvvatlash va resurslari cheklangan IoT qurilmalarida DNN tezlashishini osonlashtirish uchun chip arxitekturasini loyihalashda ishtirok etadi. Kengaytirilgan uskunani yangilash, shuningdek, sun'iy intellektga kuch va hayotiylik kiritadi.

Edge Intelligence'ning qo'llanilish sohalari.

Aqlli kuzatuv kameralari. Zamonaviy kuzatuv tizimlari endi nafaqat tasvirni yozib oladi, balki ularni real vaqtning o'zida tahlil qilishi mumkin. Masalan, yuzni aniqlash, odamning harakatini kuzatish kabi jarayonlar to'g'ridan-to'g'ri kamera ichida ishlov beriladi. Bu ma'lumotlarni serverga yubormasdan, tezkor va xavfsiz tarzda natija olish imkonini beradi.

Dronlar va robotlar. Bugungi kunda ko'plab dron va robotlar sun'iy intellekt yordamida o'z-o'zini boshqarish imkoniyatiga ega. Ular to'siqlarni aniqlab, xavfsiz yo'lni tanlaydi yoki kerak bo'lsa, yo'nalishini o'zgartiradi. Bunday funksiyalar aynan qurilmaning o'zida bajariladi, bu esa ularning avtonom ishlashiga yordam beradi.

Aqlli uy texnologiyalari. Edge AI yordamida uy jihozlari internetga bog'lanmagan holatda ham "aqlli" bo'lib ishlashi mumkin. Misol uchun, ovozli buyruqlarni qurilma o'zida tanib olib, tegishli amalni bajaradi. Shu bilan birga, uy ichidagi harorat, yorug'lik yoki boshqa sharoitlar avtomatik tarzda sozlanadi.

Qishloq xo'jaligi. Dehqonchilikda Edge texnologiyalari katta qulaylik yaratmoqda. Maxsus sensorlar tuproq namligi, oziq moddalar darajasi yoki o'simliklarning holatini o'lchaydi va ularni tahlil qiladi. Ushbu ma'lumotlar asosida sug'orish, urug'lash yoki boshqa ishlar avtomatik tarzda boshqarilishi mumkin.

Chakana savdo sohasi. Do'konlar va savdo markazlarida xaridorlarning xatti-harakatlarini tahlil qilish uchun Edge AI texnologiyalaridan foydalanilmoqda. Masalan, qaysi mahsulotlarga ko'proq e'tibor qaratilayotganini aniqlab, ularning joylashuvi optimallashtiriladi. Bundan tashqari, mahsulot zaxirasi monitoring qilinib, tugab borayotgan tovarlar haqida ogohlantirish beriladi.

Foydalanish holatlari: AI chekkada aqlli qarorlar qabul qiladi. Real vaqt rejimida ma'lumotlarni qayta ishlash va aqlli qaror qabul qilish katta o'zgarishlarga olib kelishi mumkin bo'lgan sanoatga xos misollar mavjud. Ishlab chiqarish muhitida AIni vizual tekshirish tizimlari bilan birlashtirish sifat nazorati va ishchilar xavfsizligini yaxshilashi mumkin. AI modellari real vaqt rejimida konveyerdagi mahsulotlardagi xavfsizlik darajasi yoki nuqsonlarini aniqlay oladi. Bu tekshirishlarni yanada aniqroq qilish va ishlab chiqarish jarayonida muammolarni erta aniqlash imkonini beradi. Biroq, u AI modeli tomonidan ma'lumotlarni qayta ishlashni va keyin qurilma tomonidan juda tez harakat qilishni talab qiladi.

Tarmoq kechikishini kamaytirish. Edge computing texnologiyasi ma'lumotlarni bevosita foydalanuvchiga yaqin bo'lgan qurilmalarda qayta ishlash imkonini beradi. Bu esa markaziy bulut serverlariga yuboriladigan va javob olinadigan vaqtni sezilarli darajada qisqartiradi. Masalan, real vaqtli video kuzatuv tizimlarida yoki sanoat avtomatizatsiyasida kechikishning kamayishi operativ qaror qabul qilishni osonlashtiradi.

Xavfsizlik va maxfiylikni oshirish. Ma'lumotlar lokal qurilmalarda qayta ishlangani sababli, ularni markaziy serverga yuborishga ehtiyoj kamayadi. Bu esa xakerlik hujumlari, ma'lumotlar yo'qolishi yoki ruxsatsiz kirish xavfini pasaytiradi. Ayniqsa, sog'liqni saqlash, moliya yoki xavfsizlik sohalarida bu afzallik muhim ahamiyatga ega.

Autonomiya: internet uzilganida ham ishlash. Edge intelligence tizimlari mahalliy hisoblash imkoniyatiga ega bo'lgani uchun, ular internet aloqasi yo'q yoki beqaror bo'lgan holatlarda ham ishlay oladi. Bu, ayniqsa, qishloq hududlari yoki infrastrukturasi zaif bo'lgan joylarda qo'llanilishi uchun qulaylik yaratadi.

AIning resurs cheklangan qurilmalarda ishlashi. Edge qurilmalar, odatda, markaziy serverlarga nisbatan kamroq xotira, hisoblash quvvati va energiya resurslariga ega. Bu esa murakkab sun'iy intellekt modellarining samarali ishlashiga to'sqinlik qiladi. Natijada, modellarni siqish, optimallashtirish yoki maxsus yengil versiyalarni yaratishga ehtiyoj tug'iladi.

Modelni joylashtirish va yangilash murakkabligi. AI modellarini har bir edge qurilmaga alohida o'rnatish va ularni muntazam yangilab borish katta mehnat va texnik resurslarni talab qiladi. Bu ayniqsa, katta tarmoqlar va har xil turdagi qurilmalarda murakkablik tug'diradi. Bundan tashqari, yangilanishlar vaqtida moslik, xavfsizlik va uzluksizlik masalalarini hal qilish zarur bo'ladi.

Edge Intelligence IoT tizimlarining kelajagi. Edge Intelligence — ya'ni chekka (edge) darajadagi sun'iy intellekt – IoT (Internet of Things) tizimlarining keyingi bosqich rivojida muhim o'rin tutadi. Markazlashtirilgan bulut infratuzilmasiga qaramlikni kamaytirgan holda, ma'lumotlarni real vaqtda qayta ishlash imkoniyati IoT qurilmalarini yanada aqlli, samarali va mustaqil qiladi. Kelajakda aqlli shaharlar, tibbiy monitoring, avtomatlashtirilgan transport vositalari kabi sohalarda Edge Intelligence texnologiyalarining keng qo'llanilishi kutilmoqda.

AI modellarining yengil va samarali variantlarini ishlab chiqish (TinyML). Edge qurilmalarning cheklangan resurslariga moslashgan yengil AI modellari – TinyML (Tiny Machine Learning) – sohada yangi yo'nalish sifatida shakllanmoqda. TinyML modellarining afzalligi shundaki, ular minimal energiya, xotira va hisoblash quvvati talab qilgan holda foydali natijalar bera oladi. Kelgusida TinyML texnologiyalari turli xil sensorlar, mobil qurilmalar va mikroprotsessorlarda ishlash uchun keng imkoniyatlar ochadi.

5G va Edge texnologiyalari uyg'unligi. 5G tarmoqlari yuqori tezlikdagi, past kechikishli va keng tarmoqli aloqa imkoniyatlarini taqdim etadi. Edge computing

texnologiyalari bilan birgalikda bu foydalanuvchilarga bevosita yaqin hududlarda katta hajmdagi ma'lumotlarni tezkor va xavfsiz tarzda qayta ishlash imkonini beradi. 5G va Edge Intelligence'ning uyg'unligi, xususan, avtonom transport, masofaviy tibbiyot, sanoatni avtomatlashtirish va immersiv AR/VR tizimlarida inqilobiy yechimlar yaratishi kutilmoqda.

IoT tizimlarining samarali ishlashi uchun ma'lumotlarni tezkor, xavfsiz va ishonchli tarzda tahlil qilish tobora muhim ahamiyat kasb etmoqda. Bu borada Edge Intelligence texnologiyasi bulutli arxitekturalarning chegaralarini bartaraf etish orqali IoT tizimlariga yuqori tezlik, past kechikish, va lokal avtonom qaror qabul qilish imkoniyatlarini taqdim etmoqda.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, kuzatuv tizimlaridan tortib to aqlli qishloq xo'jaligigacha bo'lgan sohalarda edge intelligence asosida optimallashtirilgan tahlil nafaqat samaradorlikni oshiradi, balki energiyani tejash, ma'lumotlarni himoya qilish va uzluksiz ishlashni ham ta'minlaydi.

Shu bilan birga, cheklangan hisoblash resurslari, modellarni siqish zaruriyati, va qurilmalarning turli arxitekturalari kabi texnik muammolarni hal etish zarurati mavjud. Ushbu yo'nalishda TinyML, 5G va federativ o'rganish kabi texnologiyalar Edge Intelligence asosidagi IoT tizimlarining kelajakdagi rivojlanishiga yo'l ochmoqda. Natijada, ushbu yondashuv sanoat, transport, sog'liqni saqlash, va boshqa ko'plab sohalar uchun istiqbolli yechim bo'lib xizmat qilmoqda.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. M. Armbrust et al., "A view of cloud computing," *Commun. ACM*, vol. 53, no. 4, pp. 50–58, 2010.
2. S. Ghemawat, H. Gobioff, and S.-T. Leung, "The Google file system," *ACM SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, vol. 37, no. 5, pp. 29–43, 2003.], MapReduce
3. J. Dean and S. Ghemawat, "MapReduce: Simplified data processing on large clusters," *Commun. ACM*, vol. 51, no. 1, pp. 107–113, 2008.], Apache Hadoop

4. K. Shvachko, H. Kuang, S. Radia, and R. Chansler, "The hadoop distributed file system," in *Proc. IEEE 26th Symp. Mass Storage Syst. Technol. (MSST)*, Incline Village, NV, USA, 2010, pp. 1–10.
5. M. Zaharia, M. Chowdhury, M. J. Franklin, S. Shenker, and I. Stoica, "Spark: Cluster computing with working sets," in *Proc. 2nd USENIX Conf. Hot Topics Cloud Comput.*, vol. 10. Boston, MA, USA, 2010, p. 10.
6. K. Ashton, "That Internet of Things thing," *RFiD J.*, vol. 22, no. 7, pp. 97–114, 2009.
7. H. Sundmaeker, P. Guillemin, P. Friess, and S. Woelfflé, "Vision and challenges for realising the Internet of things," vol. 20, no. 10, 2010.
8. J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
9. "Cisco global cloud index: Forecast and methodology, 2014–2019 white paper," 2014.
10. D. Evans, "The Internet of Things: How the next evolution of the Internet is changing everything," CISCO White Paper, vol. 1, pp. 1–11, 2011.
11. Z. Zhou, X. Chen, E. Li, L. Zeng, K. Luo, and J. Zhang, "Edge intelligence: Paving the last mile of artificial intelligence with edge computing," *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 8, pp. 1738–1762, Aug. 2019.
12. Y. Sun, M. Peng, Y. Zhou, Y. Huang, and S. Mao, "Application of machine learning in wireless networks: Key techniques and open issues," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 4, pp. 3072–3108, 4th Quart., 2019.], [7 7. Q. Mao, F. Hu, and Q. Hao, "Deep learning for intelligent wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 2595–2621, 4th Quart., 2018.
13. M. Peng and K. Zhang, "Recent advances in fog radio access networks: Performance analysis and radio resource allocation," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 5003–5009, 2016.

14. M. Peng, S. Yan, K. Zhang, and C. Wang, "Fog-computing-based radio access networks: Issues and challenges," *IEEE Netw.*, vol. 30, no. 4, pp. 46–53, Jul. 2016.
15. J. Lin, W. Yu, N. Zhang, X. Yang, H. Zhang, and W. Zhao, "A survey on Internet of Things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications," *IEEE Internet Things J.*, vol. 4, no. 5, pp. 1125–1142, Oct. 2017.
16. Edge Computing: Use Cases, Key Providers, and Implementation Options
17. <https://www.altexsoft.com/blog/edge-computing/> Murojvat vaqti:17.05.2025 12:11.