

UDK: 004.75 + 004.382.7

EDGE COMPUTING VA IOT INTEGRATSIYASI: REAL-TIME MA'LUMOTLAR QAYTA ISHLASH

Islomov Diyorbek Zafar o'g'li

Iqtisodiyot va pedagogika universiteti o'qituvchisi

Shamsiyev Damir, Sunatov Quvonchbek,

Tojiyev Shohimardon, Maxmudov Isomiddin

Iqtisodiyot va pedagogika universiteti talabalari

Annotatsiya: Ushbu maqolada Edge Computing (chekkaviy hisoblash) texnologiyasining Internet of Things (IoT) qurilmalari bilan integratsiyasi va real-time ma'lumotlar qayta ishlashga ta'siri tadqiq etiladi. Markaziy bulut serverlariga bog'liqlikni kamaytirish, kechikish (latency) muammosini hal qilish va tarmoq kengligi xarajatlarini optimallashtirish imkoniyatlari o'rganiladi. Turli edge platformalari (Raspberry Pi 4B, NVIDIA Jetson Nano, AWS Greengrass) da o'tkazilgan testlar natijalari tahlil qilinadi. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, edge arxitekturasi bulut-yagona yondashuvga nisbatan kechikishni 94% gacha kamaytiradi va tarmoq trafigini 78% ga qisqartiradi.

Kalit so'zlar: *edge computing, IoT, real-time qayta ishlash, fog computing, latency, MQTT, markazlashmagan arxitektura, smart qurilmalar*

1. KIRISH (INTRODUCTION)

Internet of Things (IoT) qurilmalar soni 2024-yil holatiga ko'ra 15.9 milliardga yetdi va 2030-yilga kelib bu ko'rsatkich 29.4 milliarddan oshishi kutilmoqda [1]. Bunday ulkan ma'lumot oqimini an'anaviy bulut arxitekturasida qayta ishlash bir qancha jiddiy muammolarni keltirib chiqaradi: yuqori latency (50–300 ms), tarmoq kengligi cheklovlari va uzilish vaqtidagi to'xtab qolish holatlari.

Edge Computing – hisoblash kuchini ma'lumot manbaiga imkon qadar yaqin joylashtirish paradigmasi – ushbu muammolarga muqobil yechim sifatida ahamiyat kasb etmoqda. Masalan, sanoat robotikasida 1 ms dan kam kechikish talab etiladi; sog'liqni saqlashda bemorning holat monitoringi to'xtovsiz ishlashi shart; avtonom transport vositalari esa bulut javobini kutib tura olmaydi.

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadlari: (1) edge computing va IoT integratsiyasining real-time qayta ishlashga ta'sirini miqdoriy baholash; (2) turli edge platformalari samaradorligini taqqoslash; (3) tarmoq trafigi va energiya sarfini o'lchash; (4) qo'llanilish sohalari bo'yicha muayyan tavsiyalar ishlab chiqish.

Tadqiqot yangiligi: O'zbekiston sharoitida sanoat va qishloq xo'jaligi IoT tizimlariga edge computing ni joriy etishning texnik-iqtisodiy asosini taqdim etuvchi dastlabki qiyosiy tadqiqotlardan biridir.

2. MATERIALLAR VA METODLAR (MATERIALS & METHODS)

2.1. Tadqiqot muhiti va jihozlar

Tajribalar uchun uch xil konfiguratsiya sozlandi: (A) faqat bulut arxitekturasi – AWS EC2 t3.medium instansiya, Frankfurt mintaqasi (o'rtacha RTT: 120 ms); (B) Edge + bulut hybrid – Raspberry Pi 4B (4GB RAM, quad-core Cortex-A72) va NVIDIA Jetson Nano (4GB, 128-core Maxwell GPU); (C) fog computing qatlami – uchta Raspberry Pi klaster.

IoT qurilmalari sifatida 20 ta DHT22 harorat/namlik sensori, 10 ta HC-SR04 ultratovush masofaölçer va 5 ta kamera moduli (Raspberry Pi Camera v2) ishlatildi. Ma'lumot uzatish protokoli sifatida MQTT (Eclipse Mosquitto broker, QoS Level 1) tanlandi.

2.2. O'lchov metodologiyasi

Latency o'lchovi: Sensor ma'lumoti hosil bo'lgan vaqtdan qaror qabul qilingangacha bo'lgan vaqt (end-to-end latency) 10,000 o'lchov asosida o'rtacha qiymat sifatida hisoblab chiqildi.

Tarmoq trafigi: Wireshark orqali 24 soatlik monitoring; edge preprocessing va to'g'ridan-to'g'ri bulutga yuborish rejimlarida solishtirma o'lchov.

Energiya sarfi: INA219 DC current sensor orqali har bir qurilmaning quvvat sarfi (mW) real vaqtda o'lchandi.

Ishonchlilik (uptime): 30 kunlik uzluksiz monitoring; tarmoq uzilishlarida tizim xatti-harakati kuzatildi.

1-jadval. Tadqiqot infratuzilmasi parametrlari

Parametr	Raspberry Pi 4B	Jetson Nano	AWS EC2
CPU	Cortex-A72 4-yadro	Cortex-A57 4-yadro	Intel Xeon 2-yadro
RAM	4 GB LPDDR4	4 GB LPDDR4	4 GB DDR4
GPU	Yo'q	128-core Maxwell	Yo'q
Narx (USD)	~75	~149	~0.08/soat
Quvvat (W)	3–7	5–10	~50 (server)

3. NATIJALAR (RESULTS)

3.1. Latency tahlili

O'tkazilgan 10,000 o'lchov natijasida edge arxitekturasi sezilarli ustunligini namoyish etdi. Faqat bulut arxitekturasi o'rtacha end-to-end latency 187.4 ms ni tashkil etdi (min: 89 ms, max: 612 ms). Raspberry Pi 4B asosidagi edge tizimida esa bu ko'rsatkich 11.2 ms gacha tushdi – bulut variantidan 16.7 marta past. NVIDIA Jetson Nano media qayta ishlash vazifalarida 8.3 ms latency ko'rsatdi, bu esa uning GPU resurslaridan samarali foydalanishini tasdiqlaydi.

2-jadval. Arxitektura variantlari bo'yicha latency va trafik natijalari

Ko'rsatkich	Faqat Bulut	RPi 4B Edge	Jetson Nano	Fog Klaster
O'rtacha latency (ms)	187.4	11.2	8.3	9.7
Maks. latency (ms)	612	38	24	31
Tarmoq trafigi (MB/kun)	4,820	1,058	1,124	987
Trafik qisqarishi (%)	—	78.0%	76.7%	79.5%
Uptime (30 kun, %)	96.2%	99.4%	99.6%	99.8%
Energiya (mW/qurilma)	—	3,840	6,210	3,920

* Uptime ko'rsatkichi faqat edge qatlami ishlagan holatni anglatadi (internet uzilganida ham lokal qayta ishlash davom etgan)

3.2. Tarmoq trafigi va energiya sarfi

Edge qurilmalarda ma'lumotlarni dastlabki filtrlash, agregatsiya va siqish (edge preprocessing) amalga oshirilganda markaziy bulutga uzatiladigan ma'lumot hajmi 78% ga kamaydi. Bu natija ayniqsa past tarmoq kengligi mavjud bo'lgan hududlarda (masalan, O'zbekistonning qishloq tumanlari, tog'li mintaqalari) muhim ahamiyat kasb etadi.

30 kunlik monitoring davrida internet aloqasi 7 marta uzildi (jami 4.8 soat). Bu vaqt ichida faqat bulut tizimi to'liq ishlamay qoldi, edge tizimlar esa lokal qayta ishlashda davom etdi va ma'lumotlarni keshda saqlab, aloqa tiklanganidan so'ng yukladi. Bu esa edge arxitekturasi ishonchlilik (resilience) jihatdagi fundamental ustunligini isbotladi.

3.3. Jetson Nano'ning media va AI vazifalardagi roli

NVIDIA Jetson Nano GPU resurslari yordamida kamera tasvirlaridan anomaliya aniqlash (MobileNetV2 modeli, TensorRT optimizatsiya) vazifasida 8.3 ms latency ko'rsatdi. Bulut-yagona yondashuvda bu vazifa 340 ms ni olgan. Sanoat konveyeridagi

nuqsonli mahsulotlarni aniqlash scenariyida Jetson Nano 97.3% aniqlik bilan sekundiga 28 kadr tezligida ishladi.

4. MUHOKAMA (DISCUSSION)

Tadqiqot natijalari edge computing ning real-time IoT illovalar uchun qanchalik muhim ekanligini yaqqol ko'rsatdi. 187.4 ms dan 11.2 ms ga – ya'ni 94% kechikish kamaytirish – sanoat avtomatizatsiyasi, tibbiyot monitoringi va smart transport kabi krit ik sohalarda hayotiy ahamiyatga ega. Masalan, sanoat roboti 187 ms kechikishda butunlay boshqacha pozitsiyada bo'lishi mumkin, bu esa xavfsizlik muammosi tug'diradi.

Tarmoq trafigining 78% ga qisqarishi iqtisodiy jihatdan ham muhim. O'zbekistonda 4G/5G tarmoq abonentlik narxi hisoblash infratuzilmasi xarajatlarining sezilarli qismini tashkil etishi mumkin. Edge preprocessing ni joriy etish ushbu xarajatlarni uch-to'rt baravarga kamaytirishi mumkin.

Biroq edge yondashuvning o'z cheklavlari ham mavjud. Birinchidan, hisoblash resurslari cheklanganligi: Raspberry Pi 4B murakkab AI modellarini (ResNet-50, BERT) real-time da ishlatishga qodir emas. Ikkinchidan, xavfsizlik muammosi: edge qurilmalar fizik jihatdan himoyalangan muhitda joylashishi mumkin, bu esa fizik hujum (physical attack) va firmware zaifliklarini keltirib chiqaradi. Uchinchidan, qurilmalar parkini boshqarish (device management) masshtablanishi bilan murakkablashadi – 1000 ta edge qurilmani masofaviy boshqarish alohida platforma talab etadi.

O'zbekiston kontekstida qishloq xo'jaligi (precision agriculture), sanoat (smart factory), va energetika (smart grid) sektorlarida edge+IoT integratsiyasi dolzarb imkoniyat hisoblanadi. Ayniqsa, internet aloqasi barqaror bo'lmagan hududlarda offline-first edge yondashuvi ma'lumotlarning yo'qolmasligini kafolatlaydi.

Kelgusi tadqiqotlarda Federated Learning ni edge qurilmalarga tatbiq etish – ya'ni modelni markazga yubormay, qurilmada o'qitish – AI-powered IoT tizimlarning maxfiylikni oshirishi ko'rib chiqiladi.

5. XULOSA (CONCLUSION)

Ushbu tadqiqot edge computing texnologiyasining IoT tizimlari uchun quyidagi aniq miqdoriy foydalarini isbotladi: (1) latency 94% ga kamayishi (187.4 ms → 11.2 ms); (2) tarmoq trafigi 78% ga qisqarishi; (3) uptime 96.2% dan 99.4–99.8% ga oshishi; (4) internet uzilishlarida ham tizimning ishlashda davom etishi.

Platforma tanlashda: narx/samaradorlik nisbati bo'yicha Raspberry Pi 4B umumiy IoT vazifalari uchun optimal, NVIDIA Jetson Nano esa AI/ML qayta ishlash talab etuvchi illovalar (kompyuter ko'rish, anomaliya aniqlash) uchun ustunlik qiladi.

Amaliy tavsiyalar: (1) yangi IoT loyihalari boshlash paytida dastlabki arxitektura sifatida edge+bulut hybrid yondashuvi tanlangan bo'lsin; (2) MQTT

protokoli bilan Edge broker (Mosquitto yoki EMQX) joriy etilsin; (3) qurilmalar parkini boshqarish uchun AWS Greengrass yoki Azure IoT Edge platformalari ishlatilsin; (4) xavfsizlik bo'yicha TLS/SSL shifrlash va OTA (over-the-air) yangilanishlar majburiy amalga oshirilsin. Ushbu natijalarga asoslanib, O'zbekiston IT va sanoat sektorlariga edge computing ni keng joriy etish tavsiya etiladi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI

[1] IoT Analytics Research (2024). State of IoT 2024: Number of connected IoT devices. IoT Analytics GmbH, Hamburg.

[2] Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646.

[3] Varghese, B., Wang, N., Barbhuiya, S., Kilpatrick, P., & Nikolopoulos, D.S. (2016). Challenges and opportunities in edge computing. *IEEE International Conference on Smart Cloud*, 20–26.

[4] Zhang, W., Zhang, Z., & Chao, H.C. (2017). Cooperative fog computing for dealing with big data in the internet of vehicles. *IEEE Communications Magazine*, 55(12), 128–134.

[5] Ren, J., Yu, G., He, Y., & Li, G.Y. (2019). Collaborative cloud and edge computing for latency minimization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(5), 5031–5044.

[6] NVIDIA Corporation (2023). Jetson Nano Developer Kit Technical Reference Manual. Rev. 1.2. Santa Clara, CA.

[7] Amazon Web Services (2024). AWS Greengrass v2 Developer Guide. AWS Documentation.

[8] O'zbekiston Respublikasi Prezidenti (2020). "Raqamli O'zbekiston – 2030" strategiyasi to'g'risida. PF-6079-son Farmon, Toshkent.

[9] Бобомуродов, Б. С., & Исломов, Д. З. (2026). ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА СБОРА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ С ГЕОРАСПРЕДЕЛЁННЫХ ДАТЧИКОВ. *Modern education and development*, 45(2), 263-273.

[10] Бобомуродов, Б. С., & Исломов, Д. З. (2026). СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СЕТИ IoT-ДАТЧИКОВ AIR QUALITY MONITORING SYSTEM BASED ON A DISTRIBUTED IoT SENSOR NETWORK. *Modern education and development*, 45(2), 251-262.

[11] Islomov, D. Z. (2024). ARGO UML DASTURI YORDAMIDA AXBOROT TIZIMINI LOYIHALASHTIRISH USULLARI. *Экономика и социум*, (12-2 (127)), 367-372.