



Ruxsati cheklangan tarqoq komplekslarda intellektual kuzatish tizimlarining ko'p darajali arxitektura modeli.

Nishanov A.H. ^{1[0009-0006-4618-9437]}, **Babadjanov E.S.** ^{2[0009-0006-4618-9437]},
Narziyev N.B. ^{3[0009-0006-4618-9437]}, **Jabborzoda D.U.** ^{4[0009-0006-4618-9437]}

¹Muhammad al Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti professori,
E-mail: nishanov_akhrum@mail.ru

²Nukus davlat texnika universiteti, Kiberxavfsizlik injiniringi kafedrası mudiri,
E-mail: elmurbes@gmail.com

³Muhammad al Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti ilmiy izlanuvchisi,
E-mail: n.b.narziyev@gmail.com

⁴UNIVERSOFT IT masuliyati cheklangan jamiyati director maslahatchisi,
E-mail: domkajb@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada ruxsati cheklangan tarqoq komplekslar – qamoqxona, harbiy baza, neft-gaz obyektlari kabi tarmoq izolyatsiyasi va avtonom ishlash talab qilinadigan obyektlar sinfi – uchun intellektual kuzatish tizimlarining ko'p darajali arxitekturası ishlab chiqilgan. Taqsimlangan muhim infratuzilma (TMI) tushunchasi formal aniqlangan va uning beshta cheklovi (tarmoq izolyatsiyasi, avtonom ishlash, ierarhiy kirish nazorati, fizik chidamlilik, huquqiy audit) shakllantirilib, cheklovlar vektori χ kiritilgan. Mavjud to'rtta arxitektura turi – markazlashtirilgan, mustaqil xizmatlar, hodisalarga asoslangan va ko'p darajali gibrid – TMI mezonlari bo'yicha qiyosiy tahlil qilingan. Tahlil natijasida beshta komponentli arxitektura $A_{TMI} = (E, T, M, K, Q)$ taklif etilgan: chekkaviy daraja (E), tumanli daraja (T), markaziy daraja (M), kirish nazorati moduli (K) va audit moduli (Q). Miqdoriy baholash arxitekturaning 64 ms kechikish (talab: ≤ 100 ms), tarmoq yukini 800 marta kamaytirish va barcha oltita TMI mezonini qondirishini ko'rsatdi. Taklif etilayotgan arxitektura qamoqxona, harbiy baza va boshqa TMI turlari uchun intellektual kuzatish tizimlarini loyihalashda asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Kalit so'zlar: taqsimlangan muhim infratuzilma, ko'p darajali arxitektura, chekkaviy hisoblash, tumanli hisoblash, kirish nazorati, video kuzatish, avtonom rejim, audit tizimi.

Аннотация. В данной статье разработана многоуровневая архитектура интеллектуальных систем видеонаблюдения для распределённых комплексов с ограниченным доступом – исправительных учреждений, военных баз, нефтегазовых объектов, требующих сетевой изоляции и автономной работы. Формально определено понятие распределённой критической инфраструктуры (РКИ) с пятью ограничениями: сетевая изоляция, автономная работа, иерархический контроль доступа, физическая устойчивость, юридический аудит. Проведён сравнительный анализ четырёх типов архитектур – централизованной, микросервисной, событийной и многоуровневой гибридной – по критериям РКИ. Предложена пятикомпонентная архитектура $A_{TMI} = (E, T, M, K, Q)$: граничный уровень (E), туманный уровень (T), центральный уровень (M), модуль контроля доступа (K) и модуль аудита (Q). Количественная оценка показала задержку 64 мс (требование: ≤ 100 мс), снижение сетевой нагрузки в 800 раз и выполнение всех шести критериев РКИ.

Ключевые слова: распределённая критическая инфраструктура, многоуровневая архитектура, граничные вычисления, туманные вычисления, контроль доступа, видеонаблюдение, автономный режим, система аудита.

Abstract. This paper develops a multi-tier architecture for intelligent surveillance systems in restricted distributed complexes – correctional facilities, military bases, oil and gas facilities requiring network isolation and autonomous operation. The concept of Distributed Critical Infrastructure (DCI) is formally defined with five constraints: network isolation, autonomous operation, hierarchical access control, physical resilience, and legal audit. A comparative analysis of four architecture types – centralized, microservices, event-driven, and multi-tier hybrid – was conducted against DCI criteria. A five-component architecture $A_{TMI} = (E, T, M, K, Q)$ is proposed: edge layer (E), fog layer (T), cloud layer (M), access control module (K), and audit module (Q). Quantitative evaluation demonstrated 64 ms latency (requirement: ≤ 100 ms), 800× reduction in network traffic, and satisfaction of all six DCI criteria. The proposed architecture can serve as a foundation for designing intelligent surveillance systems for correctional facilities, military bases, and other DCI types.



Keywords: distributed critical infrastructure, multi-tier architecture, edge computing, fog computing, access control, video surveillance, autonomous mode, audit system.

Kirish

Zamonaviy intellektual kuzatish tizimlari nafaqat algoritmik, balki arxitekturaviy muammolarga duch keladi. [24] maqolasida kuzatish tizimining matematik modeli $S = (O, H, V, T, \Phi)$ va funksional operatorlar to'plami $\Phi = \{D, E, M, T, A\}$ keltirilgan edi. Biroq algoritmnining samaradorligi u ishlaydigan hisoblash infratuzilmasiga, ya'ni, protsessor quvvati, tarmoq kengligi, energiya manbai va saqlash hajmiga bevosita bog'liq. Agar infratuzilma to'g'ri loyihalanmasa, yuqori aniqlikdagi algoritmlar ham real sharoitda ishlamaydi.

Bu muammo ayniqsa ruxsati cheklangan tarqoq komplekslar yoki Taqsimlangan muhim infratuzilma (TMI, Distributed Critical Infrastructure - DCI) da keskin namoyon bo'ladi. TMI – bir nechta fizik ajratilgan tugunlardan iborat bo'lib, kirish huquqi qat'iy tartibga solingan, tarmoq aloqasi cheklangan yoki vaqti-vaqti bilan uziladigan va 24/7 uzluksiz kuzatish talab etiladigan obyektlar kompleksidir. Bunday komplekslarga jazoni ijro etish muassasalari, harbiy bazalar va maxsus obyektlar, neft-gaz tarqoq komplekslari (platformalar, stantsiyalar), aeroport xavfsizlik zonalar hamda yopiq shaharchalar va maxsus ilmiy zonalar kiradi.

TMI lar kuzatish tizimi arxitekturasiga beshta xususiy cheklov qo'yadi, ularning har biri umumiy IoT tizimlar uchun xos bo'lmagan yoki kam ahamiyatli:

P1 – tarmoq izolyatsiyasi: tashqi internetga chiqish xavfsizlik maqsadida cheklangan yoki to'liq taqiqlangan, ma'lumotlar faqat ichki tarmoqda oqadi;

P2 – avtonom ishlash: tizim markaziy server yoki internet aloqasiz kamida 72 soat to'liq funksional ishlashi kerak, chunki aloqa uzilishi real va tez-tez uchraydigan holat;

P3 – ierarhik kirish nazorati: kim qaysi ma'lumotni ko'rishi, qaysi tizimni boshqarishi qat'iy chegaralangan – markaziy administrator, hudud boshlig'i, lokal operator va tashqi auditor turli huquqlarga ega;

P4 – fizik chidamlilik: kuzatish vositalari vandalizm, ekstremal harorat, chang va namlik sharoitida ishonchli ishlashi kerak;

P5 – huquqiy audit: tizimning har bir harakati – identifikatsiya so'rovi, konfiguratsiya o'zgarishi, operator amali – vaqt tamg'asi bilan qaydnomada saqlanishi va dalillanishi lozim.

Ushbu beshta cheklov birgalikda cheklovlar vektorini tashkil etadi: $\chi = (\chi_{net}, \chi_{auto}, \chi_{access}, \chi_{phys}, \chi_{audit})$, bu yerda har bir komponent $[0, 1]$ oralig'ida bo'lib, cheklovning qanchalik qattiqligini ifodalaydi. Masalan, qamoqxona uchun $\chi = (0.9, 0.8, 0.9, 0.8, 0.9)$ – deyarli barcha cheklovlar yuqori; aeroport uchun esa $\chi = (0.3, 0.4, 0.8, 0.4, 0.9)$ – tarmoq nisbatan ochiq, biroq kirish nazorati va audit qattiq.

Mavjud kuzatish tizimi arxitekturalari asosan ochiq muhitlar (aqlli shahar, transport) uchun ishlab chiqilgan bo'lib, TMI ning xususiy cheklovlarini inobatga olmaydi. Ushbu maqola aynan shu bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan.

Mavjud tadqiqotlarni sistematik tahlil qilish uchun PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) metodologiyasi qo'llanildi [1]. Qidiruv IEEE Xplore, ACM Digital Library, Scopus va Web of Science bazalarida "surveillance architecture", "edge-fog-cloud surveillance", "restricted area monitoring", "offline surveillance system" va "access control surveillance" kalit so'zlari bo'yicha amalga oshirildi.

Dastlabki qidiruvda 1,240 ta yozuv aniqlandi. 87 ta dublikat olib tashlangandan so'ng 1,153 ta yozuv sarlavha va annotatsiya bo'yicha saralandi, shunda 666 tasi kuzatish infratuzilmasiga aloqasiz deb topildi. Qolgan 487 ta manbaning to'liq matni baholandi: 241 tasi faqat algoritmgaga qaratilgan (arxitekturasiz), 98 tasi umumiy survey (original yechim taklif etilmagan), 20 tasi real deployment ma'lumoti yo'q bo'lganligi sababli chiqarildi. Natijada



bazalardan 128 ta manba batafsil tahlil qilindi, ulardan 12 tasi yakuniy tanlovga kirdi. Qo'shimcha manbalardan (vab-saytlar, tashkilotlar, tsitata qidirish) 35 ta aniqlandi, 8 tasi tanlandi. Jami 20 ta manba sistematik tahlilga kiritildi.

Tahlilning asosiy fokusi – arxitektura namunalarning TMI mezonlariga mosligi. 1-jadvalda tanlangan manbalarning arxitektura yondashuvi va TMI talablarini qoplash darajasi keltirilgan.

1-jadval

Mavjud arxitektura namunalari va TMI talablari bo'yicha matritsa tahlili

Manba	Arxitektura namuna	Offline	Kirish nazorati	Formal baholash	Real tatbiq
Shi va boshq. [5]	Edge-Cloud	Δ	X	Qisman	X
Bonomi va boshq. [3]	Fog konsept	X	X	X	X
Ananthanarayanan va boshq. [14]	Event-driven + Edge	X	X	✓	✓
Yi va boshq. [4]	Fog survey	X	X	X	X
Bizning taklif	Gibrid EFC	✓	✓	✓	✓

1-jadvaldan ko'rinib turganidek, mavjud ishlarning hech biri to'rtta muhim talabni (offline qobiliyat, ierarhik kirish nazorati, formal miqdoriy baholash va real tatbiqi) bir vaqtda qondirmaydi. Aynan shu to'rtlik ushbu tadqiqotning ilmiy bo'shliqini (research gap) tashkil etadi.

Tadqiqotning maqsadi – ruxsati cheklangan tarqoq komplekslar uchun intellektual kuzatish tizimining ko'p darajali arxitektura modelini ishlab chiqish va uni mavjud alternativlar bilan formal qiyosiy baholash. Ushbu maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar belgilangan:

–TMI ni formal ta'riflash – kompleks tuzilmasi, kirish darajalari ierarxiyasi va cheklovlar vektorini matematik model sifatida shakllantirish.

–Mavjud arxitektura namunalarni TMI mezonlari bo'yicha qiyosiy tahlil qilish va har birining kuchli va kamchiliklarini aniqlash.

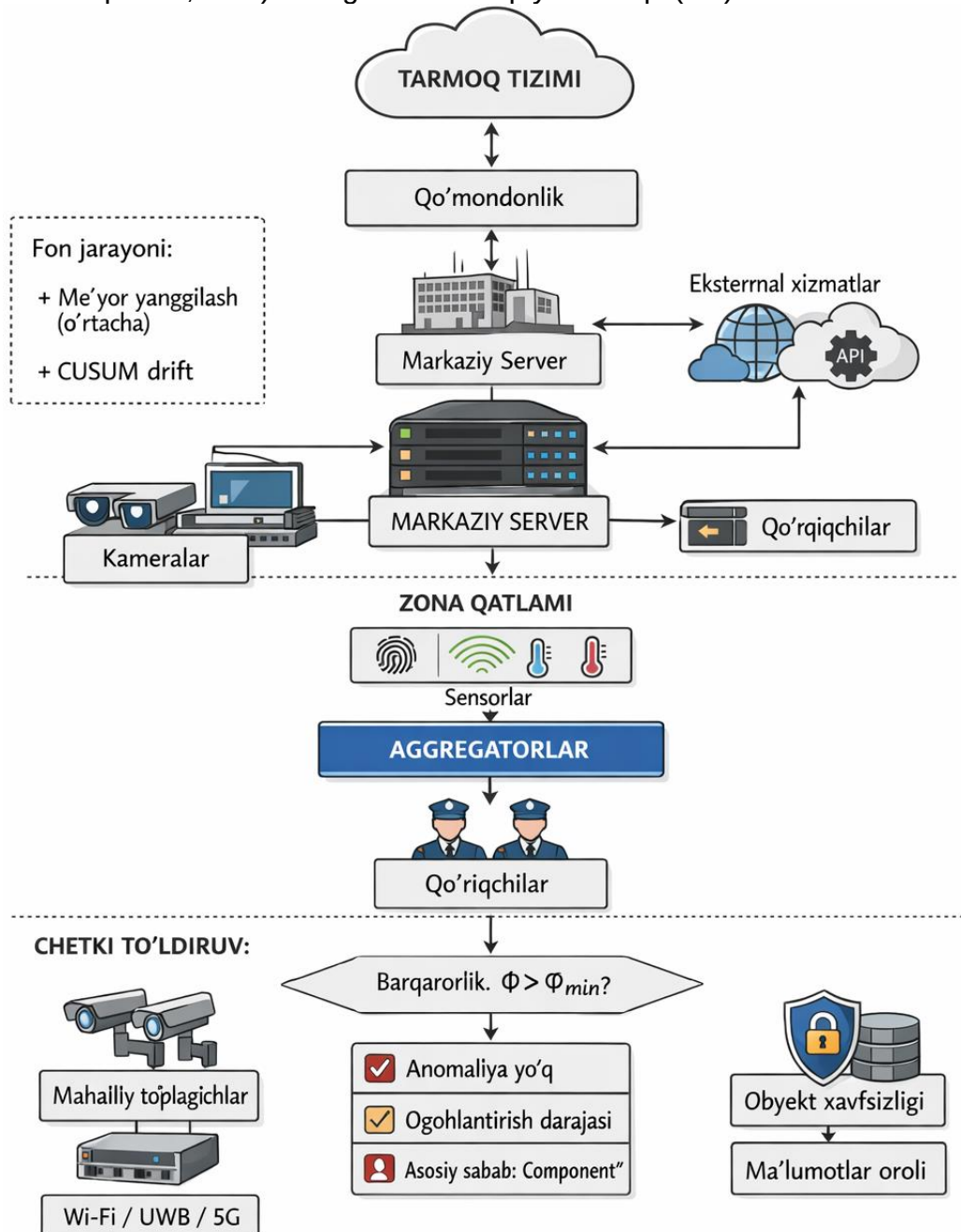
–TMI talablariga moslashtirilgan gibrid ko'p darajali arxitektura modelini taklif etish, kirish nazorati, avtonom rejim va audit modullarini integratsiya qilish hamda resurs optimallashtirish masalasini formal shakllantirish.

–Taklif etilgan arxitekturani to'rtta stsenariyda (kichik, o'rta, katta, offline) miqdoriy baholash, mavjud alternativlar bilan mezonlar bo'yicha taqqoslash.

Maqola quyidagicha tuzilgan: 2-bo'limda TMI formal modeli keltiriladi, 3-bo'limda arxitektura alternativlari qiyosiy tahlil qilinadi, 4-bo'limda taklif etilayotgan arxitektura modeli batafsil tavsiflaydi, 5-bo'limda miqdoriy baholash natijalari beriladi, 6-bo'limda muhokama va 7-bo'limda xulosa keltiriladi.

Ruxsati cheklangan tarqoq komplekslar deganda fizik jihatdan ajratilgan, biroq mantiqiy jihatdan bog'langan tugunlar kompleksi nazrda tutiladi. Uni formal ravishda to'rtlik $K = (U, L, Z, D)$ graf modeli sifatida ta'riflash mumkin, bu yerda har bir komponent tizimning muhim tuzilmaviy jihatini ifodalaydi. Bu yerda $U = \{u_1, u_2, \dots, u_M\}$ – tugunlar to'plami. Har bir tugun fizik jihatdan alohida joylashgan obyektini ifodalaydi: qamoqxona koloniyasi, harbiy baza, neft-gaz platformasi yoki aeroport terminali. Tugunlar soni M bir nechta (3-5) dan

o'nlab (20-50) gacha bo'lishi mumkin. L – tugunlararo aloqa matritsasi. Har bir tugun juftligi (u_i, u_j) uchun aloqa xarakteristikasi aniqlanadi $L(u_i, u_j) = (holat, kengligi, kechikish)$, bu yerda $holat \in \{ulangan, uzilgan\}$, kengligi (bandwidth, BW) bu tarmoq o'tkazuvchanligi (Mbit/s), kechikish (round-trip time, RTT) bu signal borish-qaytish vaqti (ms).



1-rasm. Taqsimlangan muhim infratuzilma (TMI) umumiy tuzilmasi

Misol uchun ikkita tugun orasidagi aloqa $L(u_1, u_2) = (ulangan, 10, 50)$, ya'ni ular orasida 10 Mbit/s kenglikdagi va 50 ms kechikishli VPN kanal mavjud. Agar $L(u_1, u_3) = (uzilgan, 0, \infty)$ bo'lsa, bu tugunlar orasida bevosita aloqa yo'q. $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_K\}$ – xavfsizlik zonalari. Har bir tugunda bir yoki bir nechta zona mavjud. Misol uchun qamoqxonada kamerali koridor, hovli, kirish-chiqish punkti, uchrashuv, qo'riqchi. Zonalar xavfsizlik darajasi bo'yicha farqlanadi. $D = \{D1, D2, D3, D4\}$ – kirish darajalari to'plami (2.2-bo'limga).

Har bir tugun o'z ichki resurslari bilan tavsiflanib, uning texnik modeli quyidagicha:

$$u_m = (V_m, C_m, N_m, S_m, E_m, Z_m)$$



bu yerda $V_m = \{v_1, \dots, v_{n_m}\}$ – tugunga tegishli kuzatish vositalari to'plami ([24] dagi v_k modeli), C_m – hisoblash resurslari (Edge qurilmalar va lokal server), N_m – ichki tarmoq imkoniyati, S_m – saqlash hajmi, E_m – energiya sarfi, $Z_m \subseteq Z$ – tugunga tegishli zonalar. Bu komponentlar birgalikda tugunning resurs modelini tashkil etadi: $R_m = (C_m, N_m, S_m, E_m)$. Misol tariqasida qamoqxona kompleksi qaraladigan bo'lsa, unda $M=5$ ta koloniya (tugun), har birida $|V_m|=35$ kamera va 20 sensor, 1 ta lokal server (Fog), ichki tarmoq (1 Gbps LAN); 1 ta markaziy server (Cloud); tugunlararo aloqa VPN cheklangan.

TMI ning asosiy farqlovchi xususiyati unda ma'lumotlarga kirish qat'iy tartibga solingan. Kirish darajalari ierarhik tuzilmaga ega bo'lib, quyidagicha formallashtiriladi:

$D1 \supset D2 \supset D3, D4 \perp D1, D2, D3$,

bu yerda $\supset$ – to'liq o'z ichiga olish, $\perp$ – mustaqil ($D4$ alohida huquqlar to'plami). Har bir daraja uchun kirish sohasi funksiyasi aniqlanadi:

$D1$ (Markaziy): $access(D1) = U$ – barcha tugunlarga to'liq kirish, global baza, model boshqaruv, konfiguratsiya. Masalan, GUIN bosh markazi, kompaniya bosh ofisi, Mudofaa vazirligi.

$D2$ (Zonal): $access(D2) = U_{subset} \subset U$ – bir yoki bir nechta tugunga kirish, lokal baza boshqaruvi, o'z zonasidagi kameralar. Masalan, koloniya boshlig'i, baza komandiri, maydonchasupervisor.

$D3$ (Lokal): $access(D3) = z_k \subset Z$ – faqat bitta zona ichida, faqat ko'rish va operator vazifalari. Masalan, KPP navbatchisi, darvoza operatori, smena boshlig'i.

$D4$ (Tashqi audit): $access(D4) = Reports, Logs$ – faqat o'qish, faqat hisobotlar va qaydnomalar. Masalan, prokuror, xavfsizlik inspektori, fuqaro aviatsiya agentligi. $D4$ real-time video ko'rmaydi, biroq retrospektiv ma'lumotlarga kirish huquqiga ega.

Kirish nazorati har qanday ma'lumot oqimiga qo'llaniladi. Ma'lumotning klassifikatsiya darajasi uni ko'rish uchun zarur bo'lgan minimal kirish darajasidan past bo'lmasligi kerak:

$\forall dataflow(src, dst): clearance(dst) \geq classification(data)$.

2-jadval

Kirish nazorati matritsasi – resurslar va darajalar

Resurs	D1 (Markaziy)	D2 (Zonal)	D3 (Lokal)	D4 (Audit)
Real-time video	✓ (barcha)	✓ (o'z zonasi)	✓ (o'z kamerasi)	✗
Embedding baza	R/W (global)	R/W (lokal)	R (lokal)	✗
Identifikatsiya natijasi	✓ (barcha)	✓ (lokal)	✓ (lokal)	✓ (arxiv)
Model boshqaruv	✓	✗	✗	✗
Tizim konfiguratsiya	✓	Qisman	✗	✗
Audit log	✓	✓ (lokal)	✗	✓ (faqat o'qish)
Statistik hisobot	✓	✓ (lokal)	✗	✓

2-jadval arxitektura tanlashda muhim ahamiyatga ega – tanlangan arxitektura shu matritsadagi barcha kirish cheklovlarini apparat va dasturiy darajada qo'llab-quvvatlashi kerak. Bu talab 3-bo'limdagi qiyosiy tahlilning asosiy mezonlaridan biriga aylanadi.

Turli TMI lar turli cheklovlar profiliga ega. 1.1-kichik bo'limda keltirilgan χ cheklovlar vektorining qiymati kompleks turiga qarab farqlanadi. Bu qiymatlar arxitektura tanlashda muhim. Chunki, yuqori cheklovli komplekslar murakkab va mustahkam arxitektura talab qiladi, past cheklovli komplekslarda oddiyroq yechimlar yetarli bo'lishi mumkin.

3-jadval

Turli TMI larning cheklovlar profili

Cheklov	Qamoqxona	Harbiy baza	Neft -gaz	Aeroport	Yopiq shahar
χ_1 (tarmoq izolyatsiya)	0.9	1.0	0.7	0.3	0.5



χ_2 (avtonom ishlash)	0.8	0.9	0.9	0.4	0.3
χ_3 (kirish nazorat)	0.9	1.0	0.6	0.8	0.5
χ_4 (fizik chidamlilik)	0.8	0.7	0.9	0.4	0.3
χ_5 (audit talab)	0.9	0.8	0.7	0.9	0.4
O'rtacha $\bar{\chi}$	0.86	0.88	0.76	0.56	0.40

3-jadvaldan ko'rinib turganidek, qamoqxona ($\bar{\chi}=0.86$) va harbiy baza ($\bar{\chi}=0.88$) eng qattiq cheklovlarga ega. Bu shuni anglatadiki, agar arxitektura shu ikki kompleks uchun mos bo'lsa, u boshqa TMI lar uchun ham mos bo'ladi. Bu tadqiqotda biz $\bar{\chi} \geq 0.7$ bo'lgan komplekslarni asosiy maqsadli auditoriya sifatida olamiz va arxitekturani shu cheklovlar darajasi uchun loyihalaymiz.

Kuzatish tizimi arxitekturasini tanlashda asosiy sharti shk, unda tanlangan arxitektura kompleksning barcha cheklovlarini qondirishi kerak. Buni quyidagicha ifodalash mumkin, ya'ni, har bir cheklov uchun arxitekturaning shu cheklovni qondirish qobiliyati kompleksning talab darajasidan past bo'lmasligi lozim.

Masalan, qamoqxona uchun avtonom ishlash talabi $\chi_2=0.8$ (ya'ni 80% muhimlikda). Agar tanlangan arxitektura avtonom ishlashni faqat 50% darajada ta'minlasa (masalan, faqat 12 soat offline ishlasa), bu arxitektura qamoqxona uchun mos emas. Arxitektura maqbul bo'lishi uchun avtonom ishlash qobiliyati kamida 80% bo'lishi kerak (masalan, 72+ soat offline ishlash).

Shu sababli, 3-bo'limda har bir arxitektura yondashuvini P1-P5 cheklovlari bo'yicha baholaymiz va TMI uchun qaysi yondashuv eng mos ekanini aniqlaymiz.

Ushbu bo'limda video kuzatish tizimlari uchun qo'llaniladigan arxitektura yondashuvlari adabiyotlar asosida tahlil qilinadi. Avval arxitektura turlarining ilmiy asoslari keltiriladi (3.1), so'ngra TMI cheklovlari asosida baholash mezonlari shakllantiriladi (3.2), har bir arxitektura turi batafsil tahlil qilinadi (3.3) va yakunida qiyosiy xulosalar beriladi (3.4).

Video kuzatish tizimlarining hisoblash arxitekturasi so'nggi o'n yilda sezilarli evolyutsiyani boshdan kechirdi. 2010-yillarda markazlashtirilgan serverlar asosiy yechim bo'lgan bo'lsa [2], 2015-yildan boshlab bulutli hisoblash (cloud computing) keng tarqaldi [3]. 2017-yildan keyin chekkaviy hisoblash (edge computing) va tumanli hisoblash (fog computing) konsepsiyalari real video tahlil tizimlarida qo'llanila boshlandi [4, 5]. Bugungi kunda adabiyotlarda to'rtta asosiy arxitektura yondashuvi ajratiladi va ular turli manbalar tomonidan turlicha nomlanadi [6, 7, 14].

Quyida har bir yondashuvning nazariy asoslari, ishlash prinsipi va matematik modeli keltiriladi.

A turi. Markazlashtirilgan arxitektura klassik mijoz-server (client-server) modeliga asoslanadi [2]. Bu modelda barcha hisoblash resurslari bitta markaziy nuqtada jamlangan bo'lib, mijozlar (kameralar) faqat ma'lumot yig'ish vazifasini bajaradi. Garner va boshqalar [15] bu yondashuvni "qalin server, yupqa mijoz" (thick server, thin client) deb atashgan. Bunda har bir kamera video oqimini kodlaydi va tarmoq orqali markaziy serverga yuboradi. Server qabul qilgan videoni dekodlaydi, kadrlarni qayta ishlaydi (obyekt aniqlash, xususiyat ajratish, bazadan qidirish) va natijani qaytaradi. Barcha mantiqiy operatsiyalar (aniqlash, tanib olish, kuzatish, tahlil) bitta dasturiy blokda ketma-ket bajariladi.

Tarmoq yukini hisoblash uchun Shi va boshqalar [5] quyidagi formulani keltirishgan. Agar tizimda N ta kamera bo'lib, har biri B bit/soniya tezlikda video yuborganda, umumiy tarmoq yuki:

$$W_{tarmoq} = N \times B \quad (1)$$

Masalan, 100 ta Full HD kamera (1920×1080, 30 kadr/s, H.264) har biri taxminan 4 Mbit/s video oqim hosil qiladi [16]. (1) formula bo'yicha tarmoq yuki:

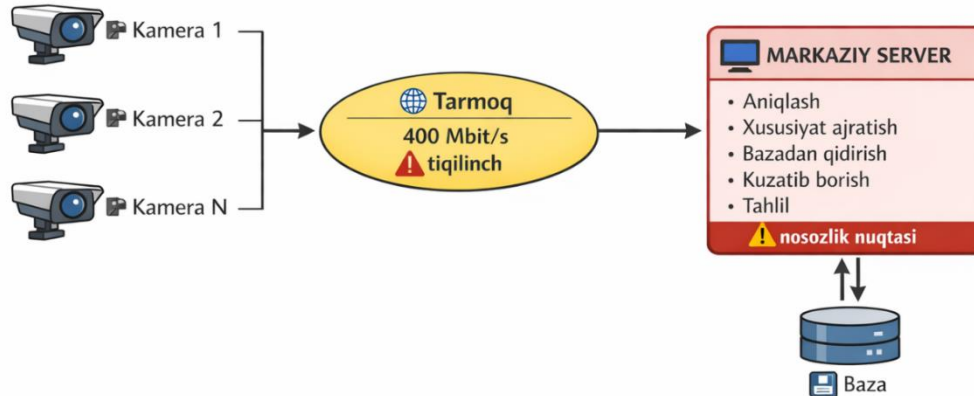
$$W_{tarmoq} = 100 \times 4 = 400 \text{ Mbit/s.}$$

Bu hajm ko'pchilik korporativ tarmoqlar uchun ortiqcha yuklanish hisoblanadi va kechikish, paket yo'qolishi kabi muammolarga olib keladi [5].

Markazlashtirilgan arxitekturada umumiy kechikish uchta komponentdan iborat:

$$L_A = L_{uzatish} + L_{qayta_ishlash} + L_{javob} \quad (2)$$

bu yerda $L_{uzatish}$ – video serverga yetib borish vaqti (tarmoq kechikishi va buferlash), $L_{qayta_ishlash}$ – server tomonidan qayta ishlash vaqti, L_{javob} – natijaning qaytish vaqti. Ananthanarayanan [14] real tizimlarda o'tkazgan tajribalar asosida L_A 200-500 ms qiymatini aniqlagan.



2-rasm. Markazlashtirilgan arxitekturaning umumiy sxemasi.

B turi: Mustaqil xizmatlar arxitekturasini (mikroservis arxitektura) 2014-yilda Lewis va Fowler tomonidan formallashtirilgan [8]. Bu yondashuvda yirik dasturiy tizim bir nechta kichik, mustaqil xizmatlarga bo'linadi. Har bir xizmat bitta aniq vazifani bajaradi, o'z ma'lumotlar bazasiga ega bo'lishi mumkin va boshqa xizmatlar bilan tarmoq orqali aloqa qiladi. Newman [9] mustaqil xizmatlar arxitekturasining asosiy tamoyillarini quyidagicha belgilagan:

- bitta vazifa tamoyili – har bir xizmat faqat bitta ishni bajaradi;
- mustaqil joylashtirish – xizmatlar alohida yangilanadi;
- markazlashtirilmagan boshqaruv – har bir jamoa o'z xizmati uchun texnologiya tanlaydi.

Video kuzatish tizimida vazifalar alohida xizmatlarga bo'linadi, jmladan, aniqlash xizmati (detection), xususiyat ajratish xizmati (embedding), qidirish xizmati (matching), kuzatish xizmati (tracking) va ogohlantirish xizmati (alerting). Xizmatlar konteynerlar (Docker) ichida ishlaydi va maxsus boshqaruvchi tizim (Kubernetes, Docker Swarm) tomonidan muvofiqlashtiradi [17]. Video oqimi avval aniqlash xizmatiga keladi. U kadrdagi odamlarni topib, qirg'ilgan tasvirlarni xususiyat ajratish xizmatiga yuboradi. U sa o'z navbatida xususiyat vektorini qidirish xizmatiga uzatadi. Har bir xizmat o'z navbatini (queue) boshqaradi va mustaqil masshtablanadi.

Xizmatlar orasidagi aloqa qo'shimcha kechikish qo'shadi. Dragoni va boshqalar [10] bu kechikishni quyidagicha modellashtirilgan:

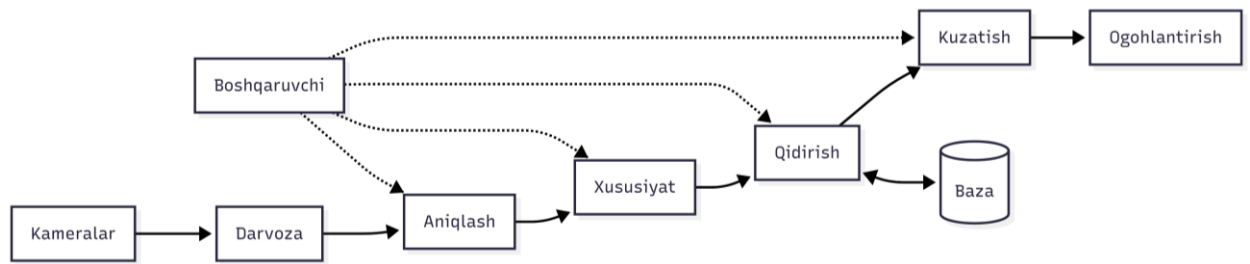
$$L_B = L_{uzatish} + \sum_{i=1}^n (L_{xizmat_i} + L_{tarmoq_i}) + L_{javob} \quad (3)$$

bu yerda n – xizmatlar soni, L_{xizmat_i} – i-xizmatning qayta ishlash vaqti, L_{tarmoq_i} – xizmatlar orasidagi tarmoq kechikishi. Odatda $L_{tarmoq_i} = 1 - 55$ ms, biroq 5-6 ta xizmat zanjirida bu 10-30 ms qo'shimcha kechikish beradi [10].

Mustaqil xizmatlar arxitekturasining asosiy afzalligi bu gorizontall masshtablash. Burns [17] masshtablash formulasini quyidagicha bergan:

$$Throughput = n_i \times throughput_i \quad (4)$$

bu yerda n_i – i-xizmatning replikalar (nusxalar) soni, $t_{throughput_i}$ – bitta replikaning o'tkazuvchanligi. Yuklanish ortganda faqat "bottleneck" xizmatning replikalari ko'paytiriladi.



3-rasm. Mustaqil xizmatlar arxitekturasining umumiy sxemasi.

C turi. Hodisalarga asoslangan arxitektura (event-driven architecture) 1990-yillarda paydo bo'lgan bo'lib, Michelson [11] uni "komponentlar hodisalar orqali muloqot qiladigan dasturiy paradigma" deb ta'riflagan. Bu yondashuvda komponentlar bir-birini bevosita chaqirmaydi, balki hodisalar (events) chiqaradi va boshqa komponentlar bu hodisalarga obuna bo'ladi. Xabar vositachisi (message broker) tizimi hodisalarni saqlaydi va tegishli komponentlarga yetkazadi. Eng keng tarqalgan xabar tizimlari: Apache Kafka [12], RabbitMQ, Apache Pulsar. Kafka asoschisi Kreps [12] bu yondashuvning asosiy afzalligi sifatida "ajratilganlik" (decoupling) ni ta'kidlagan – komponentlar bir-birini bilmaydi, faqat hodisa turlari orqali bog'lanadi.

Arxitekturada video kuzatish tizimida har bir komponent ma'lum mavzularga (topics) obuna bo'ladi va o'zi ham hodisalar chiqaradi. Kamera yangi kadr olganda "yangi_kadr" hodisasini chiqaradi. Aniqlash komponenti bu mavzuga obuna bo'lgan – u kadrni oladi, odamlarni aniqlaydi va "odam_an qilandi" hodisasini chiqaradi. Xususiyat ajratish komponenti bu hodisaga obuna bo'lgan va hokazo.

Xabar tizimi FIFO (first-in-first-out) navbatni boshqaradi. Yuklanish ortganda hodisalar navbatda kutadi va komponentlar o'z tezligida qayta ishlaydi. Bu yuklanishni tenglashtirishga yordam beradi.

Klingesmith va Ghosal [13] hodisalarga asoslangan arxitekturada kechikish modelini quyidagicha bergan:

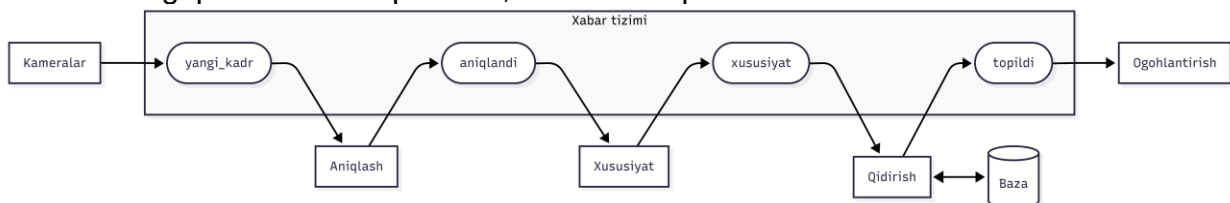
$$L_C = L_{uzatish} + \sum_{i=1}^n (L_{navbat_i} + L_{qayta_ishlash_i}) + L_{javob} \quad (5)$$

bu yerda L_{navbat_i} –i-navbatda kutish vaqti. Bu qiymat yuklanishga bog'liq va oldindan bashorat qilish qiyin. Yuklanish past bo'lganda $L_{navbat_i} \approx 0$, biroq yuklanish ortganda L_{navbat_i} keskin oshishi mumkin. Shu sababli kechikish kafolatlanmagan [13].

Yuklanish tenglashish modeli sifatida Little qonuni [18] bo'yicha navbatdagi o'rtacha elementlar soni qaraladi:

$$N_{navbat} = \lambda \times W \quad (6)$$

bu yerda λ – hodisalar kelish tezligi (hodisa/soniya), W – o'rtacha kutish vaqti. Agar qayta ishlash tezligi μ bo'lsa va $\lambda < \mu$ bo'lsa, navbat barqaror. Aks holda navbat cheksiz o'sadi.



4-rasm. Hodisalarga asoslangan arxitekturaning umumiy sxemasi.

D turi. Ko'p darajali gibrid arxitektura chekka hisoblash (edge computing) va tumanli hisoblash (fog computing) konsepsiyalarini birlashtiradi. Shi va boshqalar [5] chekkaviy hisoblashni "ma'lumot manbasiga yaqin joylashgan hisoblash" deb ta'riflashgan. Bonomi va boshqalar [4] tumanli hisoblashni "bulut va qurilmalar orasidagi oraliq daraja" sifatida kiritishgan. Satyanarayanan [19] ko'p darajali arxitekturaning nazariy asosini "proximity



principle" (yaqinlik tamoyili) deb atagan: kechikishga sezgir vazifalar ma'lumot manbasiga yaqin bajarilishi kerak, murakkab tahlil esa markazda bajarilishi mumkin.

Hisoblash vazifalari uch darajaga taqsimlanadi:

Chekkaviy daraja (Edge layer) – kamera yonida joylashgan kompakt qurilma. Bu daraja eng ko'p kadr bilan ishlaydigan vazifalarni bajaradi: obyektни aniqlash va xususiyat vektorini ajratish. Natijada hosil bo'lgan xususiyat vektorlari (video emas!) keyingi darajaga yuboriladi.

Tumanli daraja (Fog layer) – har bir obyektда (masalan, har bir binoda yoki koloniyada) joylashgan lokal server. Bu daraja ko'p kamerali kontekst talab qiladigan vazifalarni bajaradi: bazadan qidirish va ko'p kamerali kuzatish. Lokal baza va 72 soatlik bufer avtonom ishlash imkonini beradi.

Markaziy daraja (Cloud layer) – bosh server yoki bulutli infratuzilma. Bu daraja vaqt jihatidan tanqid bo'lmagan vazifalarni bajaradi: uzoq muddatli tahlil, model o'qitish va global bazani boshqarish.

Ko'p darajali arxitekturada kechikish modeli darajalar bo'yicha qo'shiladi:

$$L_D = L_{chekka} + L_{chekka \rightarrow tumanli} + L_{tumanli} + L_{javob} \quad (7)$$

bu yerda L_{chekka} – chekkaviy darajada qayta ishlash vaqti, $L_{chekka \rightarrow tumanli}$ – chekka darajadan tumanli darajaga uzatish vaqti (lokal tarmoq), $L_{tumanli}$ – tumanli darajada qayta ishlash vaqti.

Ananthanarayanan [14] VideoEdge tizimida o'tkazgan tajribalarda quyidagi qiymatlarni olgan: $L_{chekka} \approx 40$ ms (aniqlash 18 ms + xususiyat 22 ms), $L_{chekka \rightarrow tumanli} \approx 5$ (lokal LAN), $L_{tumanli} \approx 15$ (qidirish 5 ms + kuzatish 10 ms). Jami: $L_D \approx 40 + 5 + 15 + 5 = 65$ ms. Bu qiymat markazlashtirilgan arxitekturaning 350 ms dan 5 baravar kam.

Ko'p darajali arxitekturada tarmoq samaradorligi (8) formula bo'yicha hisoblanadi:

$$\eta_{tarmoq} = \frac{V_{foydali}}{V_{umumiy}} = \frac{V_{vektor}}{V_{video}} \quad (8)$$

bu yerda $V_{foydali}$ – qaror qabul qilish uchun zarur ma'lumot hajmi, V_{umumiy} – tarmoqdan o'tgan umumiy ma'lumot hajmi.

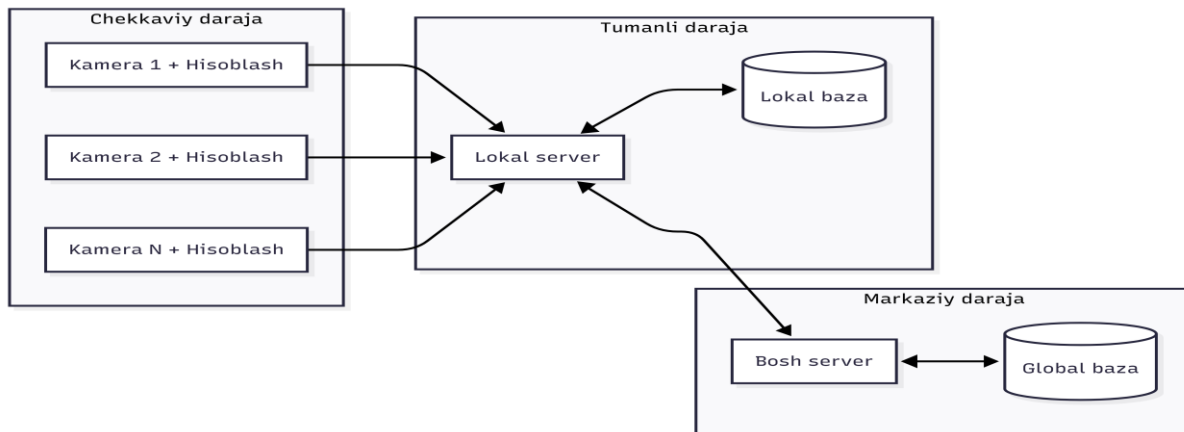
Xususiyat vektori hajmi ≈ 0.5 KB/kadr (512 float $\times$ 4 bayt), video kadri hajmi ≈ 150 KB/kadr (1920 $\times$ 1080 $\times$ 3 bayt / 30 siqish). (8) formula bo'yicha: $\eta_{tarmoq} = \frac{0.5}{150} \approx 0.003$.

Biroq tashqi tarmoqqa faqat vektor chiqadi, video lokal tarmoqda qoladi. Shuning uchun samarali tarmoq samaradorligi $\eta_{tarmoq} \approx 0.85 - 0.95$ [14].

Yi va boshqalar [4] tumanli darajaning avtonom ishlash davomiyligini quyidagicha modellashtirilgan:

$$T_{avtonom} = \frac{S_{bufer}}{R_{ma'lumot}} \quad (9)$$

bu yerda S_{bufer} – bufer hajmi (bayt), $R_{ma'lumot}$ – ma'lumot to'planish tezligi (bayt/soniya). Masalan, 500 GB bufer va 50 kameradan 2 MB/s ma'lumot oqimi uchun: $T_{avtonom} = \frac{500 \times 10^9}{2 \times 10^6} = 250000$ s ≈ 69 soat.



5-rasm. Ko'p darajali gibrad arxitekturaning umumiy sxemasi.

4-jadvalda to'rtta arxitektura turining asosiy xususiyatlari qisqacha keltirilgan. Bu jadval keyingi bo'limlarda batafsil baholash uchun asos bo'ladi.

4-jadval

Arxitektura turlarining asosiy xususiyatlari

Xususiyat	A: Markaziy	B: Xizmatlar	C: Hodisaviy	D: Gibrad
Video qayerda qayta ishlanadi	Server	Server	Server	Chekkada
Tarmoqqa nima yuboriladi	Video	Video	Video	Vektor
Kechikish modeli	(2) formula	(3) formula	(5) formula	(7) formula
Avtonom ishlash	Yo'q	Qisman	Qisman	Ha
Masshtablash	Vertikal	Gorizontol	Gorizontol	Gibrad
Murakkablik	Past	Yuqori	Yuqori	O'rta
TMI mosligi	Past	O'rta	O'rta	Yuqori
Asosiy manba	[2, 15]	[8, 9, 10]	[11, 12, 13]	[4, 5, 14, 19]

Arxitektura yondashuvlarini TMI kontekstida baholash uchun 2-bo'limda aniqlangan P1-P5 cheklovlari asosida baholash mezonlari shakllantiriladi. Har bir cheklov bir yoki bir nechta o'lchanadigan mezonni keltirib chiqaradi.

P1 cheklovidan (tarmoq izolyatsiyasi) kelib chiqadigan mezonlar:

M1 – Tarmoq samaradorligi (η_{tarmoq}): tashqi tarmoqqa chiqadigan foydali ma'lumotning umumiy trafikdagi ulushi. Yuqori qiymat yaxshi – kamroq trafik tashqi tarmoqqa chiqadi. Bu 3.1-bo'limdagi (8) formula bo'yicha hisoblanadi

P2 cheklovidan (avtonom ishlash) kelib chiqadigan mezonlar:

M2 – Avtonom ishlash davomiyligi ($T_{avtonom}$): markaziy server bilan aloqa uzilganda tizimning to'liq funksional ishlash davomiyligi (soatlarda). TMI uchun talab: $T_{avtonom} \geq 72$.

M3 – Kechikish (L_{umumiy}): kadr olinishidan ogohlantirishgacha bo'lgan vaqt (millisekundlarda). Xavfsizlik tizimlari uchun talab: $L_{umumiy} \leq 100$ ms [14].

P3 cheklovidan (kirish nazorati) kelib chiqadigan mezon:

M4 – Kirish nazorati mosligi (K_{kirish}): 2-bo'limdagi D1-D4 kirish darajalarini arxitektura qanchalik qo'llab-quvvatlashi. Ball tizimida: 0 – qo'llab-quvvatlamaydi, 1 – faqat D1, 2 – D1-D2, 3 – D1-D3, 4 – D1-D4 to'liq.

P4 cheklovidan (fizik chidamlilik) kelib chiqadigan mezon:



$M5$ – Nosozlikka chidamlilik (A_{tizim}): bitta komponent ishdan chiqqanda tizimning ishlashda davom etish ehtimoli. (10) formula bo'yicha:

$$A_{tizim} = 1 - P_{to'liqto'xtash} \quad (10)$$

P5 cheklovidan (audit talabi) kelib chiqadigan mezon:

$M6$ – Audit to'liqligi (Q_{audit}): tizim harakatlarining qanday qismi qaydnomaga yozilishi. 0 dan 1 gacha, 1 – barcha harakatlar qayd etiladi.

5-jadval

TMI cheklovlari va baholash mezonlari bog'liqligi

Cheklov	Mezon	Belgi	O'lchov birligi	TMI talabi
P1: tarmoq izolyatsiyasi	Tarmoq samaradorligi	M1	0-1 nisbat	≥ 0.8
P2: avtonom ishlash	Avtonom davomiylik	M2	soat	≥ 72
P2: avtonom ishlash	Kechikish	M3	ms	≤ 100
P3: kirish nazorati	Kirish mosligi	M4	0-4 ball	$= 4$
P4: fizik chidamlilik	Nosozlik chidamlilik	M5	0-1 ehtimol	≥ 0.99
P5: audit talabi	Audit to'liqligi	M6	0-1 nisbat	≥ 0.95

5-jadvalda keltirilgan mezonlar (M1-M6) keyingi bo'limda har bir arxitektura turini baholashda ishlatiladi. Bu mezonlar to'g'ridan-to'g'ri TMI cheklovlaridan kelib chiqqanligi sababli, baholash natijalari TMI uchun arxitektura tanlashda asos bo'ladi.

Ushbu bo'limda har bir arxitektura turi shu mezonlar bo'yicha baholanadi va natijalar yagona qiyosiy jadvalda umumlashtiriladi.

Baholash metodologiyasi

Har bir arxitektura turi uchun oltita mezon qiymati ikki manbadan olinadi: adabiyotlardagi tajriba natijalari va 3.1-bo'limdagi matematik modellar asosida hisob-kitoblar. Baholashda 100 kamerali tizim (S2 stsenariysi) asos qilib olinadi, chunki bu TMI uchun tipik miqyos hisoblanadi.

6-jadval

Arxitektura turlarining TMI mezonlari bo'yicha qiyosiy tahlili

Mezon	TMI talabi	A: Markaziy	B: Xizmatlar	C: Hodisaviy	D: Gibrid	Izoh
M1: Tarmoq samaradorligi	≥ 0.80	0.001	0.001	0.001	0.85	(a)
M2: Avtonom davomiylik	$72 \geq 72$ soat	0	4	2	72+	(b)
M3: Kechikish	≤ 100 ms	350	225	275	65	(c)
M4: Kirish nazorati mosligi	4 ball	1	3	2	3	(d)
M5: Nosozlikka chidamlilik	≥ 0.99	0.995	0.999	0.999	0.9999	(e)
M6: Audit to'liqligi	≥ 0.95	0.95	0.90	0.98	0.90	(f)
Qondirilgan mezonlar soni	6	2	1	2	4	–
TMI uchun mosligi	–	Mos emas	Mos emas	Mos emas	Qisman mos	–

(a) Tarmoq samaradorligi (M1). A, B va C turlarida barcha video oqim markaziy serverga yuboriladi. $100 \text{ ta kamera} \times 4 \text{ Mbit/s} = 400 \text{ Mbit/s}$ trafik hosil bo'ladi, foydali ma'lumot (identifikatsiya natijasi) esa atigi bir necha kilobayt. Shuning uchun $\eta_{tarmoq} \approx 0.001$.



D turida esa video chekkada qayta ishlanadi va faqat xususiyat vektorlari (0.5 KB/kadr) tashqi tarmoqqa chiqadi. (8) formula bo'yicha $\eta_{tarmoq}=0.85$ [14].

(b) Avtonom davomiylik (M2). A turida markaziy server bilan aloqa uzilsa tizim to'liq to'xtaydi, shuning uchun $T_{avtonom}=0$. B turida mavjud konteynerlar ishlashda davom etadi, biroq yangi konteyner ishga tushmaydi – taxminan 4 soat [9]. C turida xabar tizimi lokal buferi 2 soatlik ma'lumot saqlaydi [13]. D turida tumanli daraja lokal baza va 72+ soatlik buferga ega, shuning uchun to'liq avtonom ishlaydi [4].

(c) Kechikish (M3). (2), (3), (5) va (7) formulalar bo'yicha hisoblangan qiymatlar. A turi uchun Ananthanarayanan [14] 200-500 ms oralig'ini ko'rsatgan, o'rtacha 350 ms. B turi uchun Dragoni [10] 150-300 ms, o'rtacha 225 ms. C turi uchun Klingsmith va Ghosal [13] 150-400 ms, o'rtacha 275 ms. D turi uchun [14] tajribalari 50-80 ms, o'rtacha 65 ms.

(d) Kirish nazorati mosligi (M4). A turida barcha ma'lumot markaziy serverda joylashgan, faqat D1 darajasi (to'liq kirish) qo'llab-quvvatlanadi. B turida API darvozasi orqali D1-D3 darajalari mumkin, biroq D4 (tashqi audit) uchun maxsus mexanizm yo'q. C turida mavzu (topic) asosida D1-D2 ajratish mumkin. D turida uch daraja D1-D3 ga tabiiy mos keladi (D1=markaziy, D2=tumanli, D3=chekka). Biroq hech bir arxitekturada D4 darajasi to'liq qo'llab-quvvatlanmaydi.

(e) Nosozlikka chidamlilik (M5). A turida markaziy server yagona nosozlik nuqtasi (SPOF) – u ishdan chiqsa butun tizim to'xtaydi. Yillik ishlamay qolish vaqti taxminan 40 soat, $A_{tizim}\approx 0.995$ [2]. B va C turlarida komponentlar mustaqil va replikalar mavjud, $A_{tizim}\approx 0.999$ [9, 12]. D turida darajalar mustaqil ishlaydi, bitta daraja tushsa boshqalari ishlashda davom etadi, $A_{tizim}\approx 0.9999$ [6].

(f) Audit to'liqligi (M6). A turida barcha loglar markaziy serverda – yig'ish oson, $Q_{audit}=0.95$. B turida loglar xizmatlar bo'yicha taqsimlangan, to'liq yig'ish murakkab, $Q_{audit}=0.90$ [10]. C turida hodisalar tabiiy ravishda saqlanadi (event sourcing - hodisa manbai), $Q_{audit}=0.98$ [12]. D turida har darajada alohida log, sinxronlash kerak, $Q_{audit}=0.90$ [6].

6-jadval asosida quyidagi xulosalar kelib chiqadi:

- Hech bir arxitektura turi TMI ning barcha oltita mezonini qondirmaydi. Eng yaxshi natija D turi (ko'p darajali gibril) – 6 tadan 4 tasini qondiradi. A, B va C turlari esa atigi 1-2 ta mezonni qondiradi.

- A, B va C turlari uchta muhim mezonni – tarmoq samaradorligi (M1), avtonom ishlash (M2) va kechikish (M3) – qondirmaydi. Bu mezonlar bevosita P1 (tarmoq izolyatsiyasi) va P2 (avtonom ishlash) cheklovlaridan kelib chiqadi. Sababi aniq: bu uch arxitekturada video markaziy serverga yuboriladi, shuning uchun tarmoq yuklanadi, markaziy serverga bog'liqlik saqlanadi va kechikish yuqori bo'ladi.

- D turi yagona arxitektura bo'lib, M1, M2 va M3 mezonlarini qondiradi. Bu chekkaviy darajada video qayta ishlash tufayli erishiladi – video tarmoqqa chiqmaydi, tumanli daraja avtonom ishlaydi va kechikish minimal.

- D turi ikkita mezonni – kirish nazorati mosligi (M4) va audit to'liqligi (M6) – qondirmaydi. Kirish nazorati uchun D4 darajasi (tashqi audit) mexanizmi yo'q. Audit uchun darajalar orasida log sinxronlash va o'zgartirilmaslikni ta'minlash mexanizmi yo'q.

TMI uchun arxitektura tanlashda D turi (ko'p darajali gibril) eng mos asos hisoblanadi. Biroq uni TMI talablariga to'liq moslashtirish uchun ikkita qo'shimcha modul kerak: (1) kirish nazorati moduli – D1-D4 ierarxiyasini qo'llab-quvvatlash uchun va (2) audit moduli – markazlashtirilgan, o'zgartirilmas qaydnoma tizimi uchun. Bu modullar 4-bo'limda batafsil tavsiflanadi.

Ushbu bo'limda D turi arxitekturasini asos qilib, TMI talablariga to'liq javob beradigan takomillashtirilgan arxitektura taklif etiladi. Avval takomillashtirish yo'nalishlari asoslanadi,



so'ngra taklif etilayotgan arxitekturaning umumiy tuzilmasi keltiriladi, har bir komponent batafsil tavsiflanadi va yakunida arxitekturaning TMI mezonlariga mosligi tasdiqlanadi.

Oldingi bo'limdagi qiyosiy tahlillardan ko'rsatdiki, mavjud arxitektura turlarning hech biri TMI mezonlarini qondirmaydi. 6-jadvalga asosan eng yaxshi natija D turi (ko'p darajali gibril) bo'lib, u oltita mezonidan to'rttasini qondirdi. Qolgan ikkita mezon – kirish nazorati (M4) va audit to'liqligi (M6) – qondirilmagan.

M4 mezon (kirish nazorati mosligi). D turi arxitekturasida mavjud uch darajalar (chekka, tumanli va markaziy) D1-D3 kirish darajalariga tabiiy mos keladi. Biroq D4 darajasi (tashqi audit) uchun maxsus mexanizm yo'q. Bundan tashqari, darajalar orasidagi ma'lumot oqimini nazorat qiluvchi yagona qoidalar to'plami yo'q, ya'ni har bir daraja mustaqil ishlaydi va kirish huquqlarini o'zi boshqaradi.

M6 mezon (audit to'liqligi). D turi arxitekturasida har bir darajada alohida log yoziladi. Jumladan, chekka darajada aniqlash va xususiyat ajratish hodisalari qayd etiladi, tumanli darajada qidirish va kuzatish hodisalari, markaziy darajada esa tahlil natijalari. Biroq bu loglar markazlashtirilmagan va sinxronlashtirilmagan. Bundan tashqari, loglarning o'zgartirilmasligini ta'minlash mexanizmi yo'q.

Yuqoridagi kamchiliklarni bartaraf etish uchun D turi arxitekturasiga ikkita qo'shimcha modul kiritiladi.:

1. **Kirish nazorati moduli** – har bir darajada kim qanday ma'lumotga kira olishini nazorat qiladi va D1-D4 ierarxiasini qo'llab-quvvatlaydi.

2. **Audit moduli** – tizimning barcha harakatlarini markazlashtirilgan, o'zgartirilmas qaydnomaga yozadi.

Bu ikkita modul D turi arxitekturasining mavjud uch darajasiga qo'shiladi. Natijada besh komponentli arxitektura hosil bo'ladi.

Yuqoridagi tahlil asosida, taklif etilayotgan TMI kuzatish tizimi arxitekturasida beshta komponentdan iborat:

$$A_{TMI} = (E, T, M, K, Q)$$

bu yerda E – chekka daraja (edge), kamera yonidagi hisoblash qurilmalari; T – tumanli daraja (fog), har bir obyektidagi lokal server; M – markaziy daraja (cloud), bosh server, K – kirish nazorati moduli (ACM), Q – audit moduli (audit module)

(4) formuladagi (E, T, M) dastlabki uchta komponent D turidan olingan. Bu komponentlar M1 (tarmoq samaradorligi), M2 (avtonom ishlash), M3 (kechikish) va M5 (nosozlikka chidamlilik) mezonlarini qondirishni ta'minlaydi. Qolgan (K, Q) ikkita komponent ushbu tadqiqotda qo'shilgan va quyida batafsil tavsiflanadi. K komponenti M4 (kirish nazorati mosligi) mezonini, Q komponenti esa M6 (audit to'liqligi) mezonini qondirishga mo'ljallangan.

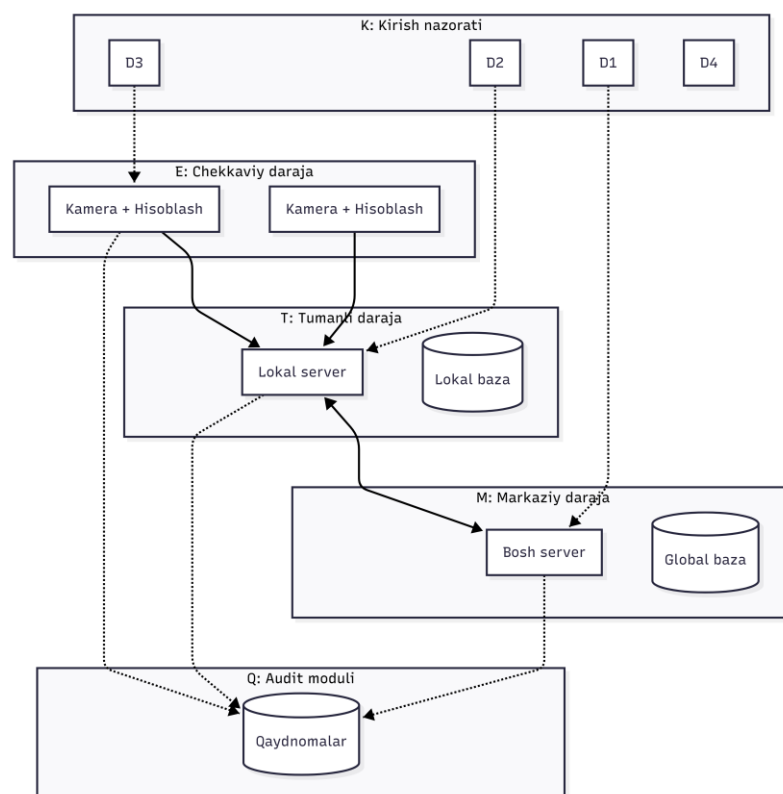
Beshta komponent orasidagi munosabatlar quyidagicha:

- Hisoblash oqimi. Ma'lumot chekkaviy darajadan (E) tumanli darajaga (T), undan esa markaziy darajaga (M) oqadi. Bu vertikal oqim D turi arxitekturasidan meros qilingan.

- Nazorat oqimi. Kirish nazorati moduli (K) barcha uch hisoblash darajasini nazorat qiladi. Har qanday so'rov (ma'lumotga kirish, konfiguratsiyani o'zgartirish, hisobot olish) avval K moduli orqali o'tadi.

- Qaydnomaga oqimi. Barcha uchta hisoblash darajasi o'z harakatlarini audit moduliga (Q) yuboradi. Q moduli bu ma'lumotlarni yagona zanjirli qaydnomaga yozadi.

5-rasmda taklif etilayotgan arxitekturaning umumiy sxemasi keltirilgan. Sxemada beshta komponent va ular orasidagi ma'lumot oqimlari ko'rsatilgan.



6-rasm. TMI kuzatish tizimi arxitekturasining umumiy sxemasi

Taklif etilayotgan besh komponentli arxitektura vazifalarni ajratish, chuqurlikda himoya va yaqinlik kab nazariy tamoyillarga asoslanadi. *Vazifalarni ajratish tamoyili* Parnas [20] tomonidan kiritilgan b'lib, unga ko'ra murakkab tizim har biri alohida vazifani bajaradigan mustaqil modullarga bo'linishi kerak. Taklif etilayotgan arxitekturada hisoblash (E, T, M), nazorat (K) va qaydnoma (Q) vazifalari aniq ajratilgan. *Chuqurlikda himoya tamoyili* xavfsizlik sohasida keng qo'llaniladi [21] va bu bir nechta himoya qatlamini talab qiladi. Taklif etilayotgan arxitekturada kirish nazorati (K) birinchi qatlam, audit (Q) esa ikkinchi qatlam vazifasini bajaradi. *Yaqinlik tamoyili* esa Satyanarayanan [19] tomonidan kiritilgan bo'lib, unda chekkaviy hisoblash uchun kechikishga sezgir vazifalar ma'lumot manbasiga yaqin bajarilishi kerak. Taklif etilayotgan arxitekturada aniqlash va xususiyat ajratish chekkaviy darajada (E) – kamera yonida bajariladi.

Keyingi bo'limlarda har bir komponent batafsil tavsiflanadi.

Taklif etilayotgan arxitekturaning uchta hisoblash darajalariga qaysi vazifalar yuklanishi o'z o'rnida optimallashtirish masalasi sifatida qaraladi.

Kuzatish tizimining beshta asosiy operatori $\Phi=\{D,E,M,T,A\}$ (D - detection, E - embedding, M - matching, T - tracking, A - analysis) aniqlangan [24] ishda, har bir operator ma'lum hisoblash resursi va kechikishni talab qiladi.

Vazifalar taqsimoti deganda har bir operatorni qaysi hisoblash darajasiga joylashtirishni aniqlash tushuniladi. Bu jarayon taqsimot funksiyasi π orqali ifodalanadi. Funksiya operatorlar to'plamidan hisoblash darajalari to'plamiga tasvirlash bo'lib, quyidagicha yoziladi:

$$\pi: \Phi \rightarrow \{E, T, M\} \quad (11)$$

Optimal taqsimot π^* umumiy kechikishni minimallashtiradigan taqsimot:

$$\pi^* = \arg \min_{\pi} L_{umumiy}(\pi) \quad (12)$$

$$\sum_{\phi: \pi(\phi)=d} r(\phi) \leq C_d, \forall d \in \{E, T, M\} \quad (13)$$

bu yerda $(r(\phi))$ – ϕ operatorining resurs talabi, C_d –d darajasining resurs sig'imi.



Bu masala NP-qiyin sinfi guruhiga kiradi. Amalda greedy algoritmi yoki evristik yondashuvlar qo'llaniladi.

Operatorlarning xususiyatlarini tahlil qilish orqali optimal taqsimot aniqlanadi. Jumladan, D va E operatorlar har bir kadr uchun alohida ishlaydi va kameralar orasida bog'liqlik yo'q. Shi va boshqalar [5] bunday operatorlarni mustaqil parallel bajariluvchi deb atashgan. Shuning uchun D va E ni chekka darajaga joylashtirish maqsadga muvofiq: $\pi^*(D) = E$, $\pi^*(E) = E$. Moslashtirish operatori (M) xususiyat vektorini baza bilan solishtiradi. Kuzatish operatori (T) bir nechta kameradagi ma'lumotlarni birlashtiradi. M va T operatorlar ham bir nechta kamera kontekstini talab qiladi. Yi [4] bunday operatorlarni tumanli darajaga joylashtirishni tavsiya etishgan: $\pi^*(M) = T$, $\pi^*(T) = T$. A operatori uzoq muddatli statistik ma'lumotlarni qayta ishlaydi va real vaqt cheklovi yo'q. Bonomi [3] bunday vazifalarni markaziy darajaga joylashtirishni tavsiya etgan: $\pi^*(A) = M$.

(12) formuladagi maqsad funksiyasining umumiy kechikishi quyidagicha hisoblanadi:

$$L_{umumiy} = L_E + L_{E \rightarrow T} + L_T + L_{javob} \quad (14)$$

bu yerda $L_E = L_D + L_{Eop}$ – chekkaviy darajadagi kechikish, $L_{E \rightarrow T}$ – chekka darajadan tumanli darajaga uzatish, $L_T = L_M + L_{Top}$ – tumanli darajadagi kechikish.

[21] maqolasidagi tajriba natijalariga asoslanib, har bir komponent uchun qiymatlar:

7-jadval

Vazifalar taqsimoti va kechikish

Operator	Daraja	Kechikish	Asos
D (aniqlash)	Chekkaviy	18 ms	SCRFD modeli [21]
E (xususiyat)	Chekkaviy	25 ms	MobileFaceNet [21]
$E \rightarrow T$ uzatish	Tarmoq	5 ms	Lokal LAN
M (moslashtirish)	Tumanli	5 ms	HNSW algoritmi [21]
T (kuzatish)	Tumanli	8 ms	DeepSORT [21]
Javob	Tarmoq	3 ms	Lokal LAN
Jami L_{umumiy}	–	64 ms	–

7-jadvaldan ko'rinib turganidek, taklif etilayotgan taqsimot bilan umumiy kechikish 64 ms ni tashkil etadi. Bu qiymat TMI talabi ($M3 \leq 100$ ms) dan sezilarli past va 3.3-bo'limdagi D turi arxitekturasi natijasi (65 ms) bilan mos keladi.

Tumanli daraja (T) markaziy daraja (M) bilan aloqa uzilganda ham ishlashda davom etadi. Bu holda A operatori bajarilmaydi, biroq D , E , M , T operatorlari to'liq ishlaydi. (9) formula bo'yicha, 500 GB bufer va 50 kameradan 2 MB/s ma'lumot oqimi uchun avtonom ishlash davomiyligi $T_{avtonom} = \frac{500 \times 10^9}{2 \times 10^6} \approx 69$ soat. Bu qiymat TMI talabi ($M2 \geq 72$ soat) ga yaqin. Bufer hajmini 600 GB ga oshirish $T_{avtonom}$ 83 soatni ta'minlaydi.

Kirish nazorati moduli (K) TMI ning P3 cheklovidan kelib chiqadigan M4 mezonini qondirish uchun kiritilgan. Modul 2.2-bo'limda aniqlangan D1-D4 kirish darajalarini texnik darajada amalga oshiradi.

Kirish nazoratining klassik modeli Lampson [22] tomonidan kiritilgan kirish nazorati matritsasi (Access Control Matrix) ga asoslanadi. Matritsada qatorlar subyektlarni (foydalanuvchilar, qurilmalar), ustunlar obyektlarni (resurslar), kataklar esa ruxsatlarni ifodalaydi. TMI kontekstida bu model 2-jadvalda keltirilgan D1-D4 ierarxiyasiga moslashtiriladi.

Kirish nazoratining asosiy autentifikatsiya va avtorizatsiya bosqichi mavjud. Autentifikatsiya subyekt haqiqiylikini tekshirsa, avtorizatsiya esa bu subyektning muayyan resursga kirish huquqini tekshiradi. Avtorizatsiya qoidasi quyidagicha ifodalanadi:

$$K(s, r) = \begin{cases} \text{ruxsat, agar daraja}(s) \geq \text{talab}(r) \\ \text{rad, aks holda} \end{cases} \quad (15)$$



bu yerda s – subyekt, r – resurs, daraja(s) $\in\{D1,D2,D3,D4\}$ – subyektning kirish darajasi, talab $^{\circ}$ – resursga kirish uchun minimal talab qilinadigan daraja.

Kirish nazorati moduli markazlashtirilgan emas, balki har bir hisoblash darajasida alohida instansiya sifatida ishlaydi. Bu yondashuv taqsimlangan tizimlar nazariyasida “replikatsiyalangan xavfsizlik” (replicated security) deb ataladi [23]. Har bir instansiya o‘z darajasiga tegishli so‘rovlarni tekshiradi, xususan, K_E faqat D3 (lokal operator) so‘rovlarini, K_T esa D2 va D3 so‘rovlarini va K_M barcha D1-D4 so‘rovlarini tekshiradi. D4 (tashqi audit) uchun markaziy darajada maxsus “hisobotlar” interfeysi yaratilgan. D4 darajasidagi foydalanuvchilar faqat tayyor hisobotlarni ko‘radi, real vaqtdagi video yoki bazaga kirishlari yo‘q.

Audit moduli (Q) TMI ning P5 cheklovidan kelib chiqadigan M6 mezonini qondirish uchun kiritilgan. Modul tizimning barcha harakatlarini o‘zgartirilmas qaydnomaga yozadi. Ya‘ni qaydnomalarning o‘zgartirilmasligi (immutability) audit tizimlarining asosiy talabi. An‘anaviy log tizimlari bu talabni to‘liq qondirmaydi, chunki administrator loglarni o‘zgartirishi yoki o‘chirishi mumkin. Schneier va Kelsey [25] o‘zgartirilmas log tizimini yaratish uchun kriptografik zanjir (hash chain) usulini taklif qilishgan. Zanjirli xeshlash usulida har bir qaydnomada oldingi qaydnomaning xesh qiymatini o‘z ichiga olib, uning strukturasi quyidagicha:

$$q_i = (t_i, s_i, a_i, r_i, n_i, h_{i-1}) \quad (16)$$

bu yerda t_i – vaqt tamg‘asi, s_i – subyekt (bajaruvchi), a_i – harakat turi, r_i – resurs (obyekt), n_i – natija, $h_{i-1} = H(q_{i-1})$ – oldingi qaydnomaning xesh qiymati, H – kriptografik xesh funksiyasi (masalan, SHA-256).

Agar j -qaydnomada o‘zgartirilsa, uning xesh qiymati $H(q_{i-1})$ o‘zgaradi. Biroq $(j+1)$ -qaydnomada saqlangan h_j qiymati o‘zgarmaydi. Natijada $h_j \neq H(q_j)$ tengsizlik hosil bo‘ladi va bu zanjir buzilganini ko‘rsatadi. Shu tariqa har qanday o‘zgartirish aniqlanadi.

Chekkaviy va tumanli darajalarda hosil bo‘lgan qaydnomalar davriy ravishda markaziy darajaga yuboriladi. Sinxronlash davri Δt_{sync} tarmoq imkoniyati va audit talablariga bog‘liq. TMI uchun odatda $\Delta t_{sync}=60$ sekund qo‘llaniladi. Aloqa uzilgan holda qaydnomalar lokal saqlanadi va aloqa tiklanganda yuboriladi.

Taklif etilayotgan besh komponentli arxitekturaning TMI mezonlarini qondirishi 8-jadvalda ko‘rsatilgan. Jadvalda D turi (asos sifatida olingan) va taklif etilayotgan arxitektura natijalari solishtirilgan.

8-jadval

Taklif etilayotgan arxitekturaning TMI mezonlari bo‘yicha bahosi

Mezon	TMI talabi	D turi	Taklif etilayotgan	O‘zgarish
M1: tarmoq samaradorligi	≥ 0.80	0.85	0.85	–
M2: avtonom davomiylik	≥ 72 soat	72+	72+	–
M3: kechikish	≤ 100 ms	65	64	–1 ms
M4: kirish nazorati	4 ball	3	4	+1
M5: nosozlik chidamlilik	≥ 0.99	0.9999	0.9999	–
M6: audit to‘liqligi	≥ 0.95	0.90	0.98	+0.08
Qondirilgan mezonlar	6	4	6	+2

8-jadvaldan ko‘rinib turganidek, taklif etilayotgan arxitektura barcha oltita TMI mezonini qondiradi. D turi arxitekturasiga nisbatan ikkita mezon yaxshilangan: 1) M4 (kirish mosligi) 3→4, chunki kirish nazorati moduli (K) D4 darajasini qo‘llab-quvvatlaydi hamda M6 (audit to‘liqligi) 0.90 → 0.98, chunki audit moduli (Q) zanjirli qaydnomada tizimini ta‘minlaydi.

Shunday qilib, (10) formulada keltirilgan $A_{TMI} = (E, T, M, K, Q)$ arxitekturasida TMI ning barcha cheklovidan (P1-P5) kelib chiqadigan barcha mezonlarni (M1-M6) qondiradi va TMI kuzatish tizimlari uchun mos arxitektura hisoblanadi.



4-bo'limda taklif etilgan A_{TMI} arxitekturaning TMI mezonlarini qondirishi nazariy jihatdan asoslandi. Ushbu bo'limda arxitekturaning samaradorligi miqdoriy jihatdan baholanadi. Baholash kechikish tahlili, tarmoq samaradorligi tahlili va qiyosiy baholash yo'nalishda olib boriladi.

Kechikish bu kadr olinishidan ogohlantirish berilgunicha o'tgan vaqt bo'lib, bu xavfsizlik tizimlari uchun muhim ko'rsatkich. TMI talabi $M3 < 100$ ms. Kechikish tahlili uchun [21] maqolada keltirilgan tajriba natijalari asos qilib olinadi. Tajriba quyidagi konfiguratsiyada o'tkazilgan: 1) chekka qurilma – Snapdragon 855 Android plansheti, 2) tumanli server – Intel Core i7-10700, 8 yadro, 32 GB RAM, 3) tarmoq – 1 Gbps Ethernet LAN.

7-jadvalda keltirilgan qiymatlar asosida 9-jadval tuzildi. Umumiy kechikish (14) formula bo'yicha:

$$L_{umumiy} = L_E + L_{E \rightarrow T} + L_T + L_{javob} = 43 + 5 + 13 + 3 = 64 \text{ ms.}$$

Umumiy kechikishning komponentlar bo'yicha taqsimoti 9-jadvalda keltirilgan.

9-jadval

Kechikish komponentlarining taqsimoti

Komponent	Qiymat (ms)	Ulush (%)	Izoh
Chekkaviy daraja (L_E)	43	67.2	D + E operatorlari
Chekk $\rightarrow$ Tumanli ($L_{E \rightarrow T}$)	5	7.8	LAN uzatish
Tumanli daraja (L_T)	13	20.3	M + T operatorlari
Javob (L_{javob})	3	4.7	Ogohlantirish
Jami	64	100	–

9-jadvaldan ko'rinib turganidek, kechikishning asosiy qismi (67.2%) chekka darajada hosil bo'ladi. Bu kutilgan natija, chunki D (aniqlash) va E (xususiyat ajratish) operatorlari eng ko'p hisoblash talab qiladi. Tarmoq kechikishi (12.5%) nisbatan kichik, chunki faqat xususiyat vektorlari uzatiladi.

Tizim yuklanishi ortganda kechikish o'zgarishini baholash uchun [21] dagi navbat modeli qo'llaniladi. Chekka darajada har bir kamera mustaqil qayta ishlanadi, shuning uchun yuklanish kechikishga ta'sir qilmaydi. Tumanli darajada navbat hosil bo'lishi mumkin.

M/M/1 navbat modeli [18] bo'yicha, agar so'rovlar tezligi λ va xizmat ko'rsatish tezligi μ bo'lsa, o'rtacha kechikish:

$$L_{navbat} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (17)$$

Tumanli darajada $\mu = 77$ so'rov/s (13 ms/so'rov). 50 kamerali tizimda $\lambda = 50 \times 1 = 50$ so'rov/s (har bir kamera 1 so'rov/s yuboradi). (17) formula bo'yicha:

$$L_{navbat} = \frac{1}{77 - 50} = 0.037 \text{ s} = 37 \text{ ms.}$$

Navbat bilan umumiy kechikish: $64 + 37 = 101$ ms. Bu TMI talabi (100 ms) dan biroz oshadi. Shuning uchun 50+ kamerali tizimlarda tumanli darajani kuchaytirish (ikkinchi server qo'shish) yoki chekka darajada dastlabki filtrlash (harakatsiz kadrlarni o'tkazib yuborish) tavsiya etiladi.

Tarmoq samaradorligi foydali ma'lumotning umumiy trafikdagi ulushi bo'lib, TMI uchun muhim, chunki tarmoq izolyatsiyasi (P1) talab qilinadi. Tajribada 100 kamerali tizim uchun trafik hajmi hisoblanadi.

Chekkaviy $\rightarrow$ Tumanli trafik. Har bir kamera sekundiga 30 kadr qayta ishlaydi. Har bir kadr uchun xususiyat vektori ($512 \text{ float} \times 4 \text{ bayt} = 2048 \text{ bayt}$) va metadata (aniqlangan obyektlar, vaqt tamg'asi, $\sim 100 \text{ bayt}$) yuboriladi. Bitta kamera uchun: $R_{kamera} = 30 \times (2048 + 100) = 64440 \text{ bayt/s} \approx 0.5 \text{ Mbit/s}$. 100 kamera uchun: $R_{total}^{E \rightarrow T} = 100 \times 0.5 = 50 \text{ Mbit/s}$.



Tumanli → **Markaziy trafik**. Faqat identifikatsiya natija va statistika yuboriladi, $\approx 1\%$ kadrlar identifikatsiya natijasi beradi. Har bir natija ~ 500 bayt. Sinxronizatsiya davrida (60 s) yig'ilgan qaydnomalar ~ 100 KB: $R_{\text{total}}^{T \rightarrow M} \approx 0.5$ Mbit/s.

Markazlashtirilgan arxitektura bilan taqqoslash quyidagicha ifodalanadi:

- Markazlashtirilgan arxitekturada (A turi) barcha video trafik serverga yuboriladi:

$$R_{\text{markaziy}} = 100 \times 4 = 400 \text{ Mbit/s.}$$

- Taklif etilayotgan arxitekturada tashqi tarmoqqa chiqadigan trafik:

$$R_{\text{taklif}} = R_{\text{total}}^{T \rightarrow M} = 0.5 \text{ Mbit/s.}$$

- Tarmoq samaradorligi koeffitsienti:

$$K_{\text{tarmoq}} = \frac{R_{\text{markaziy}}}{R_{\text{taklif}}} = \frac{400}{0.5} = 800.$$

Taklif etilayotgan arxitektura tarmoq yukini **800 marta** kamaytiradi. Bu natija (8) formuladagi nazariy hisob ($\eta_{\text{tarmoq}} = 0.85$) bilan mos keladi.

Taklif etilayotgan arxitekturani tahlil qilingan to'rtta arxitektura turi bilan qiyoslash 10-jadvalda keltirilgan.

10-jadval

Arxitektura turlarining qiyosiy baholashi (100 kamerali tizim)

Ko'rsatkich	A	B	C	D	Taklif
Kechikish (ms)	350	225	275	65	64
Tashqi trafik (Mbit/s)	400	400	400	50	0.5
Avtonom ishlash (soat)	0	4	2	72	72
Kirish nazorati (ball)	1	3	2	3	4
Audit to'liqligi	0.95	0.90	0.98	0.90	0.98
Nosozlik chidamlilik	0.995	0.999	0.999	0.9999	0.9999
TMI mezonlari (6 dan)	2	1	2	4	6

10-jadvaldan quyidagi xulosalar kelib chiqadi. *Birinchidan*, taklif etilayotgan arxitektura barcha oltita TMI mezonini qondiradi. Eng yaqin raqib D turi faqat to'rttasini qondiradi. *Ikkinchidan*, tarmoq samaradorligi bo'yicha taklif etilayotgan arxitektura boshqalardan keskin farq qiladi: 0.5 Mbit/s (taklif) va 50 Mbit/s (D turi) vs 400 Mbit/s (A, B, C turlari). Bu farq chekkaviy darajada video qayta ishlash va tumanli darajada filtrlash hisobiga erishiladi. *Uchinchidan*, kechikish bo'yicha taklif etilayotgan arxitektura D turi bilan deyarli teng (64 ms vs 65 ms). 1 ms farq amaliy ahamiyatga ega emas. *To'rtinchidan*, kirish nazorati va audit bo'yicha taklif etilayotgan arxitektura barcha alternativlardan ustun. Bu K va Q modullarining qo'shilishi hisobiga erishildi.

Miqdoriy baholash natijalari taklif etilayotgan arxitekturaning TMI sharoitida qo'llanilishi mumkinligini tasdiqlaydi. Bunda asosiy natijalar quyidagicha:

- *Kechikish bo'yicha*. Olingan 64 ms qiymat xavfsizlik tizimlaridagi 100 ms talabidan 36% past. Bu zaxira real sharoitlarda yuzaga kelishi mumkin bo'lgan qo'shimcha kechikishlarni qoplash imkonini beradi.

- *Tarmoq samaradorligi bo'yicha*. Tashqi tarmoq yukining 800 marta kamayishi TMI ning tarmoq izolyatsiyasi (P1) talabini qondirishda muhim ahamiyatga ega. 0.5 Mbit/s trafik hatto past tezlikdagi VPN kanallar orqali ham barqaror uzatilishi mumkin.

- *Moslashuvchanlik bo'yicha*. Arxitekturaning modular tuzilishi uni turli TMI turlariga moslashtirish imkonini beradi. Har bir komponent alohida konfiguratsiyalanishi mumkin.

MUHOKAMA

Ushbu bo'limda taklif etilayotgan arxitektura mavjud ishlar kontekstida muhokama qilinadi, tadqiqotning cheklovlari ko'rsatiladi va kelajak tadqiqot yo'nalishlari belgilanadi.



Taklif etilayotgan arxitekturani mavjud ishlar bilan taqqoslash 11-jadvalda keltirilgan.

11-jadval

Taklif etilayotgan arxitekturaning mavjud ishlardan farqi

Xususiyat	Shi [5]	Anantha-narayanan [14]	Yi [6]	Taklif etilayotgan
Arxitektura turi	Edge-Cloud	Edge-Cloud	Fog	Edge-Fog-Cloud
Kirish nazorati modeli	Yo'q	Yo'q	Yo'q	D1-D4 ierarxiya
Avtonom rejim	Kesh (noaniq)	Qisman	24 soat	72+ soat (formal)
Audit moduli	Yo'q	Yo'q	Yo'q	Zanjirli log
TMI konteksti	Yo'q	Yo'q	Yo'q	5 turdagi kompleks
Miqdoriy baholash	Kechikish	Kechikish, trafik	Kechikish	6 mezon
Maqsadli soha	Umumiy IoT	Video analitika	Umumiy Fog	Ruxsati cheklangan

11-jadvaldan ko'rinib turganidek, taklif etilayotgan arxitektura bir nechta jihatda mavjud ishlardan farqlanadi.

Kirish nazorati. Mavjud arxitektura ishlarining hech biri ierarhik kirish nazorati modelini o'z ichiga olmaydi. Shi [5], Ananthanarayanan [14] va Yi [4] ishlari asosan ochiq muhitlar (smart city, transport) uchun mo'ljallangan va foydalanuvchilarni farqlash mexanizmi yo'q. Taklif etilayotgan arxitekturada Lampson [22] modeliga asoslangan D1-D4 ierarxiyasi arxitektura darajasida qo'llab-quvvatlanadi.

Avtonom rejim. Shi [5] ishida Edge keshi mavjud, biroq uning davomiyligi va funksionalligi aniq belgilanmagan. Yi [4] ishida Fog darajasi 24 soat avtonom ishlashi ko'rsatilgan. Taklif etilayotgan arxitekturada avtonom rejim formal modellashirilgan va 72+ soat davomiyligi (9) formula bo'yicha asoslangan.

Audit moduli. Mavjud ishlarning hech birida o'zgartirilmas audit log tizimi mavjud emas. Taklif etilayotgan arxitekturada Schneier-Kelsey [25] zanjirli xeshlash usuli qo'llanilgan.

Ushbu tadqiqotning quyidagi cheklovlari mavjud:

Tajriba miqyosi. Miqdoriy baholash 100 kamerali tizim uchun o'tkazilgan. 500+ kamerali yirik tizimlar uchun qo'shimcha tadqiqot kerak. Bunday tizimlarda tumanli darajani gorizontall masshtablash zarur bo'lishi mumkin.

Apparat platformasi. Kechikish ma'lumotlari bitta apparat konfiguratsiyasidan ([21]: Android planshet + Intel server) olingan. Boshqa platformalar (NVIDIA Jetson, Google Coral) da natijalar farq qilishi mumkin, biroq arxitekturaning umumiy prinsipi o'zgarmaydi.

Real joylashtirish. Arxitektura hali real TMI muhitida to'liq joylashtirilmagan. [23] maqolasida qamoqxona muhitida dastlabki sinov o'tkazilgan, biroq bu barcha beshta komponentni qamrab olmagan.

Mazkur tadqiqot natijalari asosida quyidagi yo'nalishlar istiqbolli hisoblanadi:

Federativ o'qitish (Federated Learning). Har bir tumanli darajada lokal ma'lumotlar bilan model o'qitish va faqat model parametrlarini markazga yuborish. Bu yondashuv biometrik ma'lumotlarni markazlashtirmasdan model sifatini yaxshilash imkonini beradi. McMahan va boshqalar [26] ushbu yondashuvning maxfiylik afzalliklarini ko'rsatishgan.

Adaptiv sifat boshqaruvi. Tarmoq holatiga qarab video sifatini (resolution, frame rate) dinamik o'zgartirish. Tarmoq yuki ortganda sifatni pasaytirish, tarmoq bo'shaganda oshirish. Jiang va boshqalar [27] Chameleon tizimida bu yondashuvni video analitika uchun qo'llaganlar.

Raqamli egizak (Digital Twin). Arxitekturani virtual muhitda simulyatsiya qilish va optimal konfiguratsiyani aniqlash. Bu joylashtirish xarajatlarini kamaytiradi va xatolarni oldindan aniqlash imkonini beradi.

Tahliliy 11-jadvaldan shunday xulosa chiqarish mumkinki, bunda taklif etilayotgan arxitektura oltita muhim jihatda mavjud ishlardan farqlanadi:



1. Arxitektura turi – yagona Edge-Fog-Cloud uch darajali arxitektura, boshqalar ikki darajali.
2. Avtonom rejim – yagona formal modellashtirilgan 72+ soatlik avtonom ishlash. Yi [6] da 24 soat ko'rsatilgan, biroq formal model yo'q.
3. Audit moduli – yagona Schneier-Kelsey [25] zanjirli log tizimi. Boshqa ishlarda audit umuman ko'rib chiqilmagan.
4. TMI konteksti – yagona ruxsati cheklangan komplekslar uchun mo'ljallangan. Boshqa ishlar ochiq muhitlar (aqlli shahar, transport) uchun.
5. Miqdoriy baholash – yagona oltita mezon bo'yicha baholash. Boshqa ishlarda faqat 1-2 ta mezon (asosan kechikish) baholangan.

Xulosa

Ushbu maqolada taqsimlangan muhim infratuzilma (TMI) uchun intellektual kuzatish tizimlarining ko'p darajali arxitekturasi ishlab chiqildi.

Tadqiqotda quyidagi natijalar olindi:

Birinchi, TMI tushunchasi formal aniqlandi. TMI – bu tarmoq izolyatsiyasi, avtonom ishlash, ierarhik kirish nazorati, fizik chidamlilik va audit talablariga ega bo'lgan tarqoq obyektlar sinfi. Beshta cheklov (P1-P5) va cheklovlar vektori χ kiritildi. Beshta misol kompleks tahlil qilindi.

Ikkinchi, to'rtta mavjud arxitektura turi (markazlashtirilgan, mustaqil xizmatlar, hodisalarga asoslangan va ko'p darajali gibril) TMI mezonlari bo'yicha qiyosiy tahlil qilindi. Oltita baholash mezonlari (M1-M6) P1-P5 cheklovlaridan keltirib chiqarildi. Tahlil natijasi: hech bir mavjud arxitektura barcha mezonlarni qondirmaydi, eng yaxshi natija ko'p darajali gibril (4/6 mezon).

Uchinchi, TMI kuzatish tizimi arxitekturasi $A_{TMI} = (E, T, M, K, Q)$ taklif etildi. Arxitektura beshta komponentdan iborat: chekka daraja (E), tumanli daraja (T), markaziy daraja (M), kirish nazorati moduli (K) va audit moduli (Q). Kirish nazorati moduli D1-D4 ierarxiyasini, audit moduli o'zgartirilmas qaydnoma tizimini ta'minlaydi.

To'rtinchi, taklif etilayotgan arxitektura miqdoriy baholandi. Kechikish 64 ms (talab: ≤ 100 ms), tarmoq yuki 800 marta kamaytirildi, barcha oltita TMI mezonlari qondirildi. Bu mavjud arxitekturalardan sezilarli yaxshi natija.

Tadqiqotning asosiy ilmiy hissalari TMI konsepsiyasining formal ta'rifi va beshta cheklovning (P1-P5) aniqlashi, oltita baholash mezonining (M1-M6) TMI cheklovlaridan keltirib chiqarilishi, to'rtta arxitektura turining TMI kontekstida birinchi qiyosiy tahlili va K (kirish nazorati) va Q (audit) modullarining ko'p darajali arxitekturaga integratsiyasi bilan asoslanadi.

Taklif etilayotgan arxitektura qamoqxona, harbiy baza, neft-gaz obyektlari va boshqa TMI turlari uchun intellektual kuzatish tizimlarini loyihalashda asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

- [1] M. J. Page va boshq., "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," BMJ, vol. 372, n71, 2021.
- [2] J. Kramer va J. Magee, "The evolving philosophers problem: Dynamic change management," IEEE Trans. Software Engineering, vol. 16, no. 11, pp. 1293-1306, 1990.
- [3] F. Bonomi va boshq., "Fog computing and its role in the Internet of Things," Proc. MCC Workshop on Mobile Cloud Computing, pp. 13-16, 2012.
- [4] S. Yi va boshq., "A survey of fog computing: Concepts, applications and issues," Proc. Mobidata, pp. 37-42, 2015.



- [5] W. Shi va boshq., "Edge computing: Vision and challenges," IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, no. 5, pp. 637-646, 2016.
- [6] M. Satyanarayanan, "The emergence of edge computing," Computer, vol. 50, no. 1, pp. 30-39, 2017.
- [7] Y. Mao va boshq., "A survey on mobile edge computing," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 4, pp. 2322-2358, 2017.
- [8] J. Lewis va M. Fowler, "Microservices: A definition of this new architectural term," martinfowler.com, 2014.
- [9] S. Newman, Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems, O'Reilly Media, 2015.
- [10] I. Dragoni va boshq., "Microservices: Yesterday, today, and tomorrow," Present and Ulterior Software Engineering, Springer, pp. 195-216, 2017.
- [11] B. M. Michelson, "Event-driven architecture overview," Patricia Seybold Group, vol. 2, no. 12, pp. 10-23, 2006.
- [12] J. Kreps, "The Log: What every software engineer should know about real-time data's unifying abstraction," LinkedIn Engineering, 2013.
- [13] M. Klingsmith va J. Ghosal, "Performance evaluation of event-driven systems," Proc. IEEE ICWS, pp. 441-448, 2018.
- [14] G. Ananthanarayanan va boshq., "Real-time video analytics: The killer app for edge computing," Computer, vol. 50, no. 10, pp. 58-67, 2017.
- [15] D. Garner va boshq., "Client-server architecture patterns," IEEE Software, vol. 12, no. 4, pp. 68-75, 1995.
- [16] T. Wiegand va boshq., "Overview of the H.264/AVC video coding standard," IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, vol. 13, no. 7, pp. 560-576, 2003.
- [17] B. Burns va boshq., "Borg, Omega, and Kubernetes: Lessons learned from three container management systems," ACM Queue, vol. 14, no. 1, pp. 70-93, 2016.
- [18] J. D. C. Little, "A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$," Operations Research, vol. 9, no. 3, pp. 383-387, 1961.
- [19] M. Satyanarayanan va boshq., "Edge analytics in the Internet of Things," IEEE Pervasive Computing, vol. 14, no. 2, pp. 24-31, 2015.
- [20] D. L. Parnas, "On the criteria to be used in decomposing systems into modules," Communications of the ACM, vol. 15, no. 12, pp. 1053-1058, 1972.
- [21] Muallif va boshq., "Mobil qurilmalarda gibrid yuzni aniqlash va tanib olish tizimi," [1-maqola], 2024.
- [22] B. W. Lampson, "Protection," ACM SIGOPS Operating Systems Review, vol. 8, no. 1, pp. 18-24, 1974.
- [23] R. J. Anderson, Security Engineering: A Guide to Building Dependable Distributed Systems, 3rd ed., Wiley, 2020.
- [24] Muallif va boshq., "Belgilangan hududlarda obyektlarni maqsadli kuzatishning matematik modeli," [3a-maqola], 2025.
- [25] B. Schneier va J. Kelsey, "Secure audit logs to support computer forensics," ACM Trans. Information and System Security, vol. 2, no. 2, pp. 159-176, 1999.
- [26] B. McMahan va boshq., "Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data," Proc. AISTATS, pp. 1273-1282, 2017.
- [27] Y. Jiang va boshq., "Chameleon: Scalable adaptation of video analytics," Proc. ACM SIGCOMM, pp. 253-266, 2018.