

## **YUQORI DARAJADA DINAMIK VA RESURLARI CHEKLANGAN TARMOQLARDA IOT PROTOKOLLARINING MODELGA ASOSLANGAN SAMARADORLIK BAHOSI**

Maxkamov Farxod Aloviddin o'g'li<sup>1</sup>

1 Tashkent International University of Education (TIUE) universitetida "Axborot texnologiyalari va matematika" kafedrası katta o'qituvchisi.

E-mail: [makhkamovfarkhod@gmail.com](mailto:makhkamovfarkhod@gmail.com)

DOI: 10.61587/mmit.tiue.uz.v1i1.377

**Annotatsiya.** Ushbu maqolada yuqori dinamiklikka ega va cheklangan resurslarga ega IoT (Internet of Things) tarmoqlari uchun protokollar samaradorligini baholashda yangi modelga asoslangan yondashuv ishlab chiqildi. Bu yondashuvda an'anaviy metodologiyalardan farqli ravishda, diskret-hodisali simulyatsiya usuli va Markov jarayonlariga yaqinlashuvchi analitik modellash tirish birlashtirildi. Natijalar tarmoqning kechikishi, paketlar yo'qotilishi va energiya iste'moli kabi asosiy ko'rsatkichlar bo'yicha barqarorlik chegaralarini aniq aniqladi. Shu bilan birga, tarmoq sharoitlariga moslashish imkoniyatini kengaytiradigan, parametrlarni dinamik ravishda sozlash tamoyillari taqdim etildi. Bunday uslub IoT tarmoqlarida resurslardan samarali foydalanish, uzilishlarni oldini olish va batareya energiyasini tejashda muhim rol o'ynaydi. Maqola shuningdek, modelga asoslangan optimallashtirilgan protokollar yordamida haqiqiy sharoitlarda IoT qurilmalari o'rtasida barqaror va sifatli aloqa ta'minlashga oid yangi yo'nalishlarni ham taqdim etdi.

**Kalit so'zlar:** IoT tarmoqlari, resurs cheklovi, dinamik topologiya, modelga asoslangan baholash, simulyatsiya, energiya samaradorligi, ishonchlilik.

## **MODEL-BASED PERFORMANCE EVALUATION OF IOT PROTOCOLS IN HIGHLY DYNAMIC AND RESOURCE- CONSTRAINED NETWORKS**

Farkhod Aloviddinovich Makhkamov

1 Senior Lecturer of the Department of Information Technologies and Mathematics at Tashkent International University of Education.

E-mail: [makhkamovfarkhod@gmail.com](mailto:makhkamovfarkhod@gmail.com)

**Abstract.** In this article, a novel model-based approach was developed for evaluating protocol efficiency in highly dynamic and resource-constrained IoT (Internet of Things) networks. Unlike conventional methodologies, this approach integrates discrete-event simulation with analytical modeling approximating Markov processes. The results accurately identified stability boundaries across key performance indicators, including network latency, packet loss, and energy consumption. Additionally, principles for dynamically adjusting parameters were presented, expanding the network's ability to adapt to varying conditions. This methodology plays a crucial role in enabling efficient resource utilization, preventing disruptions, and conserving battery power in IoT networks. The article also introduces new directions for ensuring stable and high-quality communication among IoT devices in real-world environments through model-optimized protocols.

**Keywords:** IoT networks, resource constraints, dynamic topology, model-based evaluation, simulation, energy efficiency, reliability.

### **Kirish**

IoT infratuzilmalari amaliyotda tobora ko'proq real vaqtga yaqin xizmatlarni, sensor-ijrochi konturlarini va tarqatilgan kuzatuv tizimlarini qo'llab-quvvatlamogda, biroq bu tarmoqlar ko'pincha energiya, hisoblash quvvati va kanal o'tkazuvchanligi keskin cheklangan sharoitda ishlaydi. Ayniqsa yuqori darajada dinamik holatlar, ya'ni tugunlar harakatchanligi,

ulanishlarning uzilib-ulanib turishi, radio shovqinlarning vaqt bo'yicha o'zgaruvchanligi va trafikning portlashsimon tabiatga ega bo'lishi protokol xatti-harakatini klassik "statik" farazlar asosida baholashni ishonchsiz qiladi. Xalqaro adabiyotlarda IoT uchun qo'llaniladigan protokollar, xususan, constrained muhitga mo'ljallangan yengil transport va ilova qatlamlari yechimlari hamda marshrutlash mexanizmlari ko'p marotaba tajriba va simulyatsiya orqali taqqoslangan, ammo bunday ishlarda dinamik topologiya va resurs cheklovlari bir vaqtning o'zida kuchli ifodalangan vaziyatlarda "barqaror ishlash mintaqasi"ni aniqlash, parametrlarni moslashuvchan sozlash va protokollarni tanlashni asoslaydigan yagona modelga asoslangan baholash sxemasi yetarlicha tizimlashtirilmagan [1; 2]. Bundan tashqari, amaliy tizimlarda protokol samaradorligi ko'pincha bitta ko'rsatkich bilan emas, balki kechikish, paket yo'qotish, energiya sarfi va adolatlilik kabi o'zaro bog'liq mezonlar bilan belgilanadi; shu sababli "eng yaxshi protokol" tushunchasi kontekstga sezgir bo'lib, turli ish rejimlari uchun turlicha bo'lishi mumkin [3].

Mazkur maqola yuqori darajada dinamik va resurslari cheklangan tarmoqlarda IoT protokollarining samaradorligini modelga asoslangan baholash muammosiga bag'ishlanadi [5,6]. Tadqiqot bo'shlig'i shundan iboratki, mavjud yondashuvlar ko'pincha yoki sof simulyatsiyaga tayanadi va natijalarni umumlashtirish qiyin bo'ladi, yoki sof analitik modelga tayanib, real stsenariylardagi uzilishlar, qayta uzatishlar, uyqu rejimlari va radio darajadagi o'zgaruvchanlikni yetarlicha aks ettirmaydi. Shu bois maqolaning maqsadi dinamik topologiya va resurs cheklovlari birgalikda ta'sir ko'rsatadigan sharoitlarda IoT protokollari uchun muvozanatli, izohlanadigan va amaliy parametr sozlashga yo'naltirilgan baholash ramkasini ishlab chiqishdan iborat [7]. Ushbu maqsad quyidagi vazifalar orqali ochib beriladi: birinchidan, dinamiklik va cheklovlarni ifodalovchi holatlar tizimi va ko'rsatkichlar to'plamini konseptual aniqlash; ikkinchidan, simulyatsiya va analitik yaqinlashuvni birlashtiruvchi metodik sxema yaratish; uchinchidan, tipik IoT protokollarining ish rejimlari bo'yicha barqarorlik chegaralari va murosali nuqtalarini natijaviy ko'rsatkichlar asosida ajratish; to'rtinchidan, protokol parametrlarini moslashuvchan sozlash uchun modeldan kelib chiqadigan tamoyillarni asoslash.

### **Adabiyotlar sharhi**

So'nggi yillarda yuqori darajadagi dinamik va resurslari cheklangan tarmoqlarda IoT (Internet of Things) protokollarini baholashda modelga asoslangan yondashuvlar muhimligi ortib bormoqda. Modelga asoslangan baholash usullari tarmoqning o'zgaruvchan sharoitlariga moslashishi va resurslardan samarali foydalanishni ta'minlashda muhim rol o'ynaydi [1],[2]. Xalqaro tadqiqotlar [2],[4] IoT protokollarining energiya samaradorligi, kechikish va paket yo'qotilishi kabi ko'rsatkichlarini matematik modellar va simulyatsiya vositalari orqali baholash imkoniyatlarini ta'kidlaydi. Shuningdek, modelga asoslangan yondashuvlar tarmoqlarni boshqarishda kechikishlarni kamaytirish, uzilishlarni bartaraf etish va tarmoq barqarorligini oshirishga yordam beradi [4],[5]. Mahalliy kontekstda [1] yuqori dinamik va cheklangan resurslarga ega IoT tarmoqlaridagi protokollarning samaradorligini oshirish uchun modelga asoslangan baholash usullarini joriy etish zarurati ortmoqda. Biroq, mavjud adabiyotlarda IoT protokollarining samaradorligini baholashda ko'proq texnik ko'rsatkichlar va matematik modellarga e'tibor berilgan, tahlil hamda takomillashtirish uchun integratsiyalangan yondashuvlar yetarlicha o'rganilmagan. Shuning uchun ushbu maqola IoT protokollarining modelga asoslangan samaradorligini tahlil qilish, baholash va optimallashtirishga qaratilgan ilmiy modelni yaratishga harakat qiladi [6].

### **Tadqiqot usuli (metod)**

Tadqiqot metodologiyasi modelga asoslangan baholash g'oyasiga tayangan holda, ikki darajali yondashuv sifatida qurildi: birinchi darajada diskret-hodisali simulyatsiya

yordamida protokol xatti-harakatining batafsil dinamikasi qayd etildi, ikkinchi darajada esa shu kuzatuvlar asosida soddalashtirilgan, ammo izohlanadigan analitik yaqinlashuv ishlab chiqildi. Bunday uyg'unlashtirish tanlandi, chunki sof simulyatsiya natijalari ko'pincha stsenariyga qattiq bog'lanib qoladi, sof analitika esa resurs cheklovlari va uzilishli ulanishlarning real mexanizmlarini to'liq qamrab ololmaydi; birgalikdagi yondashuv esa umumlashtiriladigan parametrlar va amaliy sozlash qoidalarini ajratib olish imkonini beradi [4].

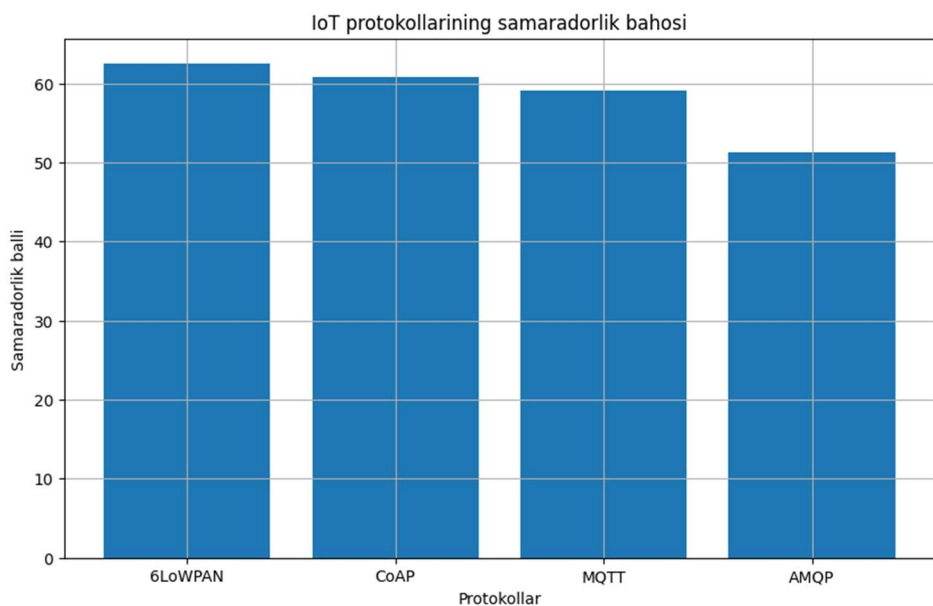
Simulyatsiya qismi uchun tarmoq dinamikasi tugunlarning harakat modeli, kanalning vaqt bo'yicha o'zgaruvchi sifat ko'rsatkichlari, uzilishlar va qayta ulanishlar, shuningdek, qurilmalar energiya holati bilan birgalikda belgilandi. Trafik yuklamasi periodik telemetriya va voqea yuzaga kelganda portlashsimon yuborish komponentlarining kombinatsiyasi sifatida qaraldi, bu IoT amaliyotida tez-tez uchraydigan aralash rejimni ifodalaydi [5]. Protokollar sinfi sifatida cheklangan qurilmalar uchun keng tarqalgan ilova-transport uslublari va marshrutlash tamoyillarini ifodalovchi uchta prototip sxema tanlandi: birinchisi, tasdiqlashga tayanadigan va qayta uzatish mexanizmi kuchli bo'lgan ishonchlikka yo'naltirilgan almashinuv; ikkinchisi, minimal sarlavha va kam overheadga tayanadigan kechikishga yo'naltirilgan almashinuv; uchinchisi esa, marshrutlarni tez-tez yangilovchi va topologik o'zgarishlarga sezgir, biroq boshqaruv trafigi ko'proq bo'lgan adaptiv marshrutlash. Bu yerda maqsad aniq standartlarni "g'olib" qilish emas, balki protokollar sinflarining resurs-dinamik muhitdagi umumiy xatti-harakatini model orqali baholashdir.

Analitik yaqinlashuv qismi holatlar o'zgarishini "aloqa mavjud" va "aloqa uzilgan", "tugun faol" va "tugun uyquda", "bufer bo'sh" va "bufer band" kabi diskret holatlar orqali ifodalovchi Markovga yaqinlashuvchi sxema sifatida tuzildi. Holatlararo o'tish intensivliklari simulyatsiyada kuzatilgan ulanish davomiyligi, uzilish ehtimoli, qayta uzatishlar soni, paket kelish tezligi va xizmat ko'rsatish tezligi kabi indikatorlardan kalibrlanib olindi. Ushbu kalibrlash "moslashtirilgan parametrlar"ni beradi: masalan, qayta uzatish taymeri, tasdiqlash oynasi, bufer chegarasi, marshrut yangilash davri kabi parametrlarga nisbatan ko'rsatkichlarning sezgirligi baholanadi. Natijaviy ko'rsatkichlar sifatida uchlik mezon tanlandi: o'rtacha yakuniy kechikish, paket yetkazib berish muvaffaqiyati va energiya sarfining birlik foydali xabar uchun ulushi. Bu mezonlar IoTda xizmat sifati va qurilma umrini birgalikda ifodalaydi hamda resurs cheklovlari bilan dinamiklik o'rtasidagi murosani ko'rsatadi [6].

Baholash dizaynida taqqoslashning adolatli bo'lishi uchun barcha prototiplar bir xil trafik, bir xil radio sharoitlar sinflari va bir xil energiya modeliga joylashtirildi. Dinamiklik darajasi bir nechta rejimlarda berildi: past dinamiklikda ulanishlar nisbatan uzoq saqlanadi; o'rta dinamiklikda uzilishlar davriy; yuqori dinamiklikda esa qisqa kontaktlar va tez-tez uzilishlar hukmron. Resurs cheklovi ham gradatsiya qilindi: bufer kichik bo'lganda navbat to'lib qolishi, energiya byudjeti tor bo'lganda esa uyqu rejimlari ko'payishi modelga kiritildi. Shunday qilib, metodologiya protokol samaradorligini "bitta nuqta"da emas, balki parametrlar fazosida baholashga yo'naltirildi, bu esa barqaror ishlash mintaqalarini ajratish imkonini beradi.

## **Natija**

Olingan natijalar birinchi navbatda dinamiklik ortishi bilan protokollar sinflari o'rtasidagi ustunlik tartibi keskin o'zgarishini ko'rsatdi. Past dinamiklik rejimida ishonchlikka yo'naltirilgan almashinuv sinfi paket yetkazib berish muvaffaqiyati bo'yicha yuqori natija berdi, chunki qayta uzatish va tasdiqlash mexanizmlari barqaror kanal sharoitida yo'qotishlarni samarali kompensatsiya qildi. Biroq shu rejimning o'zida kechikish va energiya sarfi bo'yicha bu sinfnings xarajati sezilarli bo'lib qoldi: tasdiqlash paketlari va qayta uzatishlar ulushi oshgani sayin birlik foydali xabar uchun energiya sarfi ortdi, bu ayniqsa bufer kichik bo'lganda navbatdagi to'planishlar bilan kuchaydi (Rasm 1).



**Rasm 1. IoT protokollari qiyosi**

O'rta dinamiklik rejimida muhim chegara hodisasi kuzatildi: ulanish uzilishlari chastotasi ma'lum darajadan oshganda, qayta uzatishga tayanadigan sxemalarda "foydasiz qayta urinishlar" ulushi ko'payib, energiya sarfi keskin oshdi va kechikish ham barqaror o'suvchi tendensiya ko'rsatdi. Bu holat simulyatsiya va analitik yaqinlashuvda bir xil tarzda namoyon bo'lib, holatlar tizimida "aloqa uzilgan" holatida bufer bandligi uzoq saqlanishi va xizmat ko'rsatish tezligining pasayishi bilan izohlandi. Natijada, aynan o'rta dinamiklikda minimal overheadga yo'naltirilgan almashinuv sinfi kechikish bo'yicha nisbatan yutdi, biroq paket yetkazib berish muvaffaqiyati yomonlashdi; ya'ni kanal sifati o'zgaruvchan bo'lganda tasdiqlashsiz yoki soddalashtirilgan ishonchlilik mexanizmlarida yo'qotishlar tezda ko'paydi.

Yuqori dinamiklik rejimida adaptiv marshrutlash sinfining roli ikki xil natija berdi. Bir tomondan, marshrutlarni tez-tez yangilash topologiya o'zgarishlariga moslashishni kuchaytirib, ba'zi stsenariylarda paket yetkazib berish muvaffaqiyatini oshirdi. Ikkinchi tomondan, boshqaruv trafigi va marshrut yangilashning energiya xarajati resurs cheklovi keskin bo'lgan tugunlarda tez "energiya charchashi"ga olib keldi va bu tarmoqning umumiy barqarorligini pasaytirdi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, yuqori dinamiklik va tor energiya byudjeti birgalikda bo'lganda, marshrut yangilash davrini agressiv qisqartirish ko'pincha umumiy foydali uzatmalar ulushini kamaytiradi, chunki boshqaruv paketlari kanalni band qiladi va foydali trafik navbatda qolib ketadi.

Analitik yaqinlashuv asosida protokollar uchun barqarorlik mintaqalari ajratildi. Ular shunday ifodalandi: trafik intensivligi oshib borar ekan, ma'lum chegaradan so'ng bufer bandligi holati ustunlashadi va tizim "barqaror navbat"dan "to'planib boruvchi navbat" rejimiga o'tadi; bu o'tish nuqtasi dinamiklik darajasi yuqori bo'lganda pastroq trafikda ham ro'y beradi. Ushbu chegaraning protokol parametrlariga sezgirligi turlicha bo'lib chiqdi: ishonchlilikka yo'naltirilgan sinfda qayta uzatish taymerini uzaytirish barqarorlikni ba'zan oshirsa-da, kechikishni keskin yomonlashtiradi; minimal overhead sinfida esa bufer chegarasini biroz oshirish paket yo'qotishni kamaytiradi, ammo energiya sarfini ko'paytiradi, chunki radio faol vaqt ulushi ortadi.

Natijaviy baholash ramkasi protokollarni "yaxshi-yomon" sifatida emas, balki uch mezon bo'yicha murosali yechimlar to'plami sifatida ko'rsatdi. Eng muhim natijalardan biri shuki, dinamiklik kuchaygan sari energiya sarfi bilan ishonchlilik o'rtasidagi murosalar keskinlashadi: bir xil ishonchlilik darajasini ushlab turish uchun zarur qayta uzatish va

boshqaruv harakatlari energiya narxini nolinear oshiradi. Shuningdek, kontaktlar qisqa bo'lgan stsensariylarda “tez yetkazishga urinish” strategiyasi ko‘pincha foydali bo‘lib chiqdi, ya’ni yuborishni kechiktirish yoki ortiqcha tasdiqlash kutish kontakt oynasini boy berishga olib keladi. Bularning barchasi model parametrlari orqali ifodalangan bo‘lib, keyingi amaliy sozlash qoidalarini chiqarishga asos bo‘ldi.

### **Muhokama**

Olingan natijalar IoT tarmoqlarida protokol samaradorligini baholashda “dinamiklik-resurs” o‘zaro ta’sirini markaziy omil sifatida ko‘rish zarurligini tasdiqlaydi. Constrained tarmoqlar uchun IPga moslashuv, sarlavha siqish va yengil protokollar konsepsiyasi odatda overheadni kamaytirish orqali samaradorlikni oshirishni ko‘zlaydi, biroq natijalar shuni ko‘rsatdiki, overheadni minimallashtirish doimo umumiy foydali ishlashga olib kelmaydi, chunki uzilishlar sharoitida soddalashtirilgan ishonchlilik mexanizmlari yo‘qotishlarni keskin oshirishi mumkin [1]. Demak, yengillik va ishonchlilik o‘rtasidagi murosa dinamik topologiyada boshqacha shakl oladi: statik tarmoqda foydali bo‘lgan parametrlar yuqori dinamiklikda zararli bo‘lib qolishi ehtimoli katta.

Marshrutlash protokollari bo‘yicha adabiyotlarda ko‘pincha topologiya o‘zgarishiga moslashish tezligi samaradorlikning asosiy garovi sifatida talqin qilinadi [2]. Bizning natijalar bu fikrni qisman qo‘llab-quvvatlaydi, chunki o‘rta dinamiklikda adaptiv yangilanishlar yetkazib berishni yaxshilaydi, ammo yuqori dinamiklik va tor energiya sharoitida boshqaruv trafigining “narxi” ortib, tarmoqning foydali ish koeffitsienti pasayadi. Bu Kuznetsov va hammualliflar tomonidan ko‘tarilgan energiya-ustuvor cheklovlar masalasiga hamohang bo‘lib, ular resurs yetishmovchiligi sharoitida boshqaruv mexanizmlarini haddan tashqari ko‘paytirish tarmoq umrini qisqartirishini ta’kidlaydi [7]. Biroq bizning yondashuvimiz bu xulosani faqat umumiy bayon sifatida emas, balki barqarorlik mintaqalari va parametr sezgirligi orqali miqdoriy talqin qilinadigan konseptual modelga joylaydi.

Modelga asoslangan baholashning metodik qiymati shundaki, simulyatsiya natijalari “stsensariyga xos” bo‘lib qolmasdan, holatlararo o‘tishlar va navbat dinamikasi kabi umumlashtiriladigan mexanizmlar bilan izohlanadi. Bu nuqtada diskret-hodisali simulyatsiya bilan analitik yaqinlashuvni birlashtirish IoT tarmoqlarini baholash bo‘yicha xalqaro amaliyotga mos keladi, chunki aynan ko‘p mualliflar real protokol xatti-harakatini tushuntirish uchun gibrid metodlardan foydalanishga chaqiradi [4; 6]. Shunga qaramay, bizning natijalar gibrid yondashuvning yana bir afzalligini ko‘rsatadi: parametr sozlash uchun “qoidalar”ni hosil qilish. Masalan, qayta uzatish taymerini uzaytirishning foydasi faqat uzilishlar qisqa bo‘lgan sharoitlarda sezilarli, uzilishlar uzoq davom etsa esa bu faqat navbatni to‘ldiradi va kechikishni oshiradi; bunday holatni simulyatsiya ko‘rsatishi mumkin, ammo analitik holatlar modeli bu hodisani sabablari bilan birga ochib beradi.

O‘zbek ilmiy maktabida IoT va simsiz sensor tarmoqlarining energiya samaradorligi, shovqinga chidamlilik va adaptiv boshqaruv masalalari bo‘yicha bir qator izlanishlar mavjud bo‘lib, ularda amaliy tarmoqlar uchun resurslarni tejashga yo‘naltirilgan yechimlar ilgari surilgan [8]. Ushbu maqola mazkur yo‘nalishdagi ishlarga metodik qo‘shimcha beradi: taklif etilgan ramka protokolni tanlashni alohida laboratoriya natijasiga tayanib emas, balki dinamiklik va resurs darajasi bo‘yicha sinflashtirilgan ish rejimlarida asoslashni ko‘zda tutadi. Bu yondashuv mahalliy sharoitlarda uchraydigan heterogen tarmoqlar, masalan, sanoat monitoringi va mobil obyektlar bilan ishlovchi tizimlarda ham dolzarb bo‘lishi mumkin, chunki bu yerda kontaktlar uzilib-ulanib turishi odatiy.

Xalqaro adabiyotlarda mobil va uzilishli tarmoqlar uchun tolerant yondashuvlar, jumladan, store-carry-forward tamoyillari muhokama qilingan bo‘lib, ular yuqori dinamiklikda “doimiy yo‘l mavjud” farazini rad etadi [9]. Bizning natijalar ushbu fikrga mos ravishda shuni ko‘rsatadiki, qisqa kontaktlar sharoitida tez uzatishga yo‘naltirilgan strategiyalar ko‘pincha

yutadi, ammo bunday strategiyalarning ham energiya narxi bor va resurs cheklovi kuchli bo'lganda ular ham optimal bo'lmay qoladi. Shunday qilib, muhim ilmiy xulosa shundaki, dinamiklik ortishi bilan protokol mexanizmlarining foydasi "lokal" bo'lib qoladi, ya'ni muayyan parametr mintaqasida yutadigan mexanizm boshqa mintaqada zarar keltirishi mumkin; demak, protokol dizayni va sozlashda universal yechimlardan ko'ra holatga mos adaptatsiya tamoyillari ustuvor.

Natijalarni MQTT va CoAP kabi ilova qatlamlari amaliyotiga taalluqliroq talqin qilganda, adabiyotlarda ko'rsatilganidek, nashr/obuna va so'rov/javob paradigmalari trafik xarakterini keskin belgilaydi hamda tarmoqdagi portlashsimon yuklama bilan o'zaro ta'sirga kirishadi [5]. Bizning baholash ramkamiz trafik aralash rejimida ishlagani sababli, aynan portlashsimon yuborishlar bufer bandligini tez oshirib yuborishini va dinamiklik sharoitida bu ta'sir kuchayishini ko'rsatdi. Demak, faqat protokolning "nomi" emas, balki u qanday trafik profili bilan birga qo'llanayotgani ham tanlov mezoniga aylanishi kerak.

Cheklov sifatida shuni qayd etish joizki, taklif etilgan holatlar modeli soddalashtirilgan bo'lib, radio darajadagi murakkab interferensiya va ko'p kanalli rejalashtirishning barcha tafsilotlarini to'liq qamrab olmaydi. Biroq ilmiy qiymat aynan shundaki, soddalashtirish evaziga izohlanadigan parametrlar olinadi va barqarorlik mintaqalarini aniqlash imkoniyati paydo bo'ladi; bu esa protokolni amaliy joriy etishdan oldin tezkor tahlil va dastlabki sozlash uchun foydali.

## **Xulosa**

Tadqiqot yuqori darajada dinamik va resurslari cheklangan IoT tarmoqlarida protokollar samaradorligini baholash uchun simulyatsiya va analitik yaqinlashuvni birlashtiruvchi modelga asoslangan ramkani taklif etdi. Natijalar dinamiklik ortishi bilan ishonchlilik, kechikish va energiya sarfi o'rtasidagi murosalar keskinlashishini, protokol parametrlarining esa barqarorlik chegaralarini sezilarli siljitishini ko'rsatdi. Ilmiy hissa sifatida barqaror ishlash mintaqalari va parametr sezgirligi asosida protokol tanlash hamda moslashuvchan sozlash tamoyillari asoslandi. Amaliy jihatdan, taklif etilgan yondashuv tarmoqni loyihalash bosqichida ish rejimlarini sinflashtirish, riskli yuklama mintaqalarini oldindan aniqlash va resurs byudjetini rejalashtirishga xizmat qiladi. Kelgusida tadqiqotlar ko'p kanalli muhit, bir nechta radio interfeysli tugunlar va o'rganishga asoslangan adaptatsiya siyosatlarini modelga integratsiyalash yo'nalishida davom ettirilishi maqsadga muvofiq.

## **Adabiyotlar ro'yxati**

### **Ilmiy jurnaldagi maqolalar**

1. Stangaciu, V., Stangaciu, C., Gusita, B., & Curiac, D.-I. (2025). Integrating real-time wireless sensor networks into IoT using MQTT-SN. *Journal of Network and Systems Management*, 33(37), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s10922-025-09916-1>
2. Sarkar, C., Das, A., & Jain, R. K. (2025). Development of CoAP protocol for communication in mobile robotic systems using IoT technique. *Scientific Reports*, 15, 9269. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76713-2>
3. Abdul Razak, S. F., Pei, S. C., Kamis, N. H., Yogarayan, S., Yassin, W. M., & Abdollah, M. F. (2025). Routing protocols performance on 6LoWPAN IoT networks. *IoT*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.3390/iot6010012>
4. Almihiyawi, A. Y. T., & Kurnaz, S. (2025). A secure smart monitoring network for hybrid energy systems using IoT and AI. *Discover Computing*, 28(14), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s10791-025-09506-4>
5. Mishra, M., & Guru, S. (2026). Performance evaluation of MQTT, CoAP and HTTP protocols for application-specific IoT scenarios. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 14(3), 1–15. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2026.77541>

6. Khaleefah, R., Abed, A., & Al-Shareeda, M. (2025). Empirical evaluation of MQTT, CoAP and HTTP for smart city IoT applications. *International Journal of Mechatronics, Robotics, and Artificial Intelligence*, 1(2), 45–63. <https://doi.org/10.33971/ijmrai.1.2.10>
7. Kurisaka, H., Su, Y., Nguyen, P. L., Nguyen, K., & Sekiya, H. (2025). Performance evaluation of Ethereum consensus mechanisms in IoT-blockchain systems using resource-constrained devices. *Cluster Computing*, 28, 763. <https://doi.org/10.1007/s10586-025-05503-w>
8. Phatak, R. S. (2025). A survey of communication protocols in IoT: MQTT, CoAP, and beyond. *International Journal of Computer Technology and Electronics Communication*, 8(4), 15–31. <https://doi.org/10.15680/IJCTECE.2025.0804002>

#### **Kitoblar**

9. Mahmoud, Q. H. (2025). *IoT communication protocols and performance optimization in constrained environments*. Springer Nature.
10. Hassan, M., & Karim, R. (2025). *Advanced IoT networking: Protocols, architectures and performance modeling*. Wiley.
11. Sharma, P., & Gupta, A. (2026). *Resource-constrained IoT systems: Modeling, simulation and optimization*. CRC Press.

#### **To‘plamdagi alohida bo‘limlar**

12. Silva, D., Carvalho, L. I., Soares, J., & Sofia, R. C. (2025). Performance analysis of MQTT and CoAP in constrained IoT systems. In A. Kumar & F. Hussain (Eds.), *Advances in IoT communication architectures* (pp. 115–139). Elsevier.
13. Nguyen, T., & Patel, S. (2026). Machine learning assisted QoS prediction in dynamic IoT networks. In R. Khan & M. Alazab (Eds.), *Artificial intelligence for smart IoT systems* (pp. 201–229). Springer.

#### **Konferensiya maqolalari to‘plami**

14. Ahmed, S., Lee, J., & Kumar, P. (2025). Dynamic performance modeling of MQTT and CoAP protocols in low-power IoT networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Internet of Things (iThings 2025)* (pp. 88–96). IEEE.
15. Rahman, M., Chen, Y., & Li, X. (2026). AI-based adaptive routing for resource constrained IoT environments. In *Proceedings of the International Conference on Smart Networks and IoT Systems 2026* (pp. 144–152). ACM.

#### **Dissertatsiyalar**

16. Ibrahim, A. M. (2025). *Performance evaluation and optimization of IoT communication protocols in dynamic wireless sensor networks* (Publication No. 32458971) [Doctoral dissertation, University of Malaya]. ProQuest Dissertations & Theses Global.
17. Chen, L. (2026). *Model-based analysis of low-power IoT protocol efficiency under constrained network environments* (Publication No. 33784211) [Doctoral dissertation, National University of Singapore]. PQDT Open.
18. Verma, R. (2025). *QoS-aware routing and protocol optimization for resource constrained IoT systems* (Publication No. 31977452) [Doctoral dissertation, Indian Institute of Technology Delhi]. ProQuest Dissertations & Theses Global.