ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -2

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 2

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

CHEKLANGAN SENSORLAR TARMOG‘I SHAROITIDA SHAHAR TRAFIK HOLATINI BAHOLASHNING ZAMONAVIY GRAFLI YONDASHUVLARI QIYOSIY TAHLILI

Ismoilova Anaxon
Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti
E-mail: frozen.ismoilova@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitida shahar transport tarmoqlarida trafik holatini baholash (Traffic State Estimation — TSE) uchun qo‘llaniladigan graf modellari va algoritmlari qiyosiy tahlil qilinadi. Klassik graf usullari (Dijkstra, TDSP), statistik modellar (CTM, Kalman filtri) va fazoviy-vaqtinchalik graf neyron tarmoqlari (MSTGACN, STAMImputer, Graph WaveNet) beshta ilmiy mezon asosida solishtiriladi. Xalqaro ma’lumotlar to‘plamlarida (dataset) olingan raqamli ko‘rsatkichlar tahlil qilinib, o‘rta va yirik shahar infratuzilmalari uchun eng samarali yondashuvlar ilmiy jihatdan asoslanadi.

Kalit so‘zlar: cheklangan sensorlar tarmog‘i, fazoviy-vaqtinchalik graf neyron tarmoqlari, trafik holatini baholash, grafli modellar, MSTGACN, STAMImputer, shahar transporti.

Аннотация. В данной статье проводится сравнительный анализ графовых моделей и алгоритмов, применяемых для оценки состояния транспортного потока в городских транспортных сетях в условиях ограниченного сенсорного покрытия. Классические графовые методы (Dijkstra, TDSP), статистические модели (CTM, фильтр Калмана) и пространственно-временные графовые нейронные сети (MSTGACN, STAMImputer, Graph WaveNet) сопоставляются на основе пяти научных критериев. Выполнен анализ количественных показателей, полученных на международных наборах данных, и научно обоснованы наиболее эффективные подходы для транспортной инфраструктуры средних и крупных городов.

Ключевые слова: ограниченная сеть сенсоров, пространственно-временные графовые нейронные сети, оценка состояния дорожного движения, графовые модели, MSTGACN, STAMImputer, городской транспорт.

Abstract. This paper presents a comparative analysis of graph-based models and algorithms used for traffic state estimation in urban transportation networks under limited sensor coverage conditions. Classical graph methods (Dijkstra, TDSP), statistical models (CTM, Kalman filter), and spatio-temporal graph neural networks (MSTGACN, STAMImputer, Graph WaveNet) are compared based on five scientific criteria. Quantitative results obtained from international benchmark

datasets are analyzed, and the most effective approaches for medium-sized and large urban transportation infrastructures are scientifically justified.

Keywords: limited sensor network, spatial-temporal graph neural networks, traffic state estimation, graph-based models, MSTGACN, STAMImputer, urban transportation.

1. KIRISH.

Aqlli transport tizimlarida (ITS) trafik holatini real vaqt rejimida baholash — adaptiv svetofor boshqaruvi, dinamik marshrutlashtirish va tirbandliklarning oldini olish uchun zarur poydevordir. Statistik ma’lumotlarga ko‘ra, yer yuzi aholisining 55 foizi shahar hududlarida yashaydi va bu ko‘rsatkich 2050-yilga kelib 68 foizga yetishi kutilmoqda. O‘zbekistonda amaldagi urbanizatsiya jarayoni sezilarli darajada faollashgan: Toshkent shahri aholisi rasman 3 milliondan oshdi va yo‘l-transport tizimini intellektual boshqarish maqsadida yirik chorrahalarni raqamlashtirish ishlari jadal olib borilmoqda. Bularning barchasi trafik holatini baholash masalasini mamlakatimiz miqyosida dolzarb ilmiy-amaliy muammoga aylantiradi.

Ayni vaqtda mavjud fazoviy-vaqtinchalik graf neyron tarmoqlari (ST-GNN) modellari asosan yuqori sensor zichligiga ega shaharlar uchun ishlab chiqilgan bo‘lib, METR-LA va PeMS-BAY kabi xalqaro namunaviy ma’lumotlar to‘plamlarida sinab ko‘rilgan. Biroq, ushbu ma’lumotlar to‘plamlaridagi sensor zichligi O‘zbekiston shaharlarining real sharoitidan tubdan farq qiladi: Rivojlanayotgan mamlakatlar va O‘rta Osiyo shaharlarida sensor qamrovi yo‘l tarmog‘ining bor-yo‘g‘i 30–50 foizini tashkil etishi keng tarqalgan holatdir. Sensor qamrovi cheklangan sharoitda ushbu intellektual modellarning qo‘llanish chegaralari yetarlicha tahlil qilinmaganligi maqola uchun asosiy ilmiy bo‘shliq vazifasini bajaradi.

O‘zbekistondagi mavjud tadqiqotlar hozircha faqat alohida chorrahalar yoki lokal yo‘l kesimlari bilan cheklangan bo‘lib, cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitida butun shahar tarmog‘i miqyosidagi TSE masalasini qamrab olmagan.[4, 5]. Masalan, Hamzayev (2025) tadqiqotida CCTV asosidagi lokal chorrahada svetofor boshqaruvi o‘rganilgan bo‘lsa, Allamov (2018) statik grafda marshrutlashni ko‘rib chiqqan. Ammo ko‘p manbali GPS ma’lumotlari (avtobus, taksi) va CCTV kameralari ma’lumotlarini yagona graf tizimiga birlashtirgan mahalliy tadqiqotlar mavjud emas. Mazkur maqola aynan cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitida trafik holatini baholash algoritmlarining samaradorligini qiyosiy tahlil qiladi va maqbul grafli yondashuvni asoslaydi.

2. ASOSIY TUSHUNCHALAR VA TA’RIFLAR.

2.1. Dinamik transport grafi

ISSN 3030-3907

Shahar transport tarmog‘ini $G(t) = (V, E, W(t))$ ko‘rinishidagi dinamik graf sifatida ifodalash mumkin, bu yerda V — chorrahalar (tugunlar), $E \subseteq V \times V$ — yo‘l kesimlari (qirralar), $W(t)$: $E \to \mathbb{R}^+$ — vaqtga bog‘liq qirra og‘irliklari funksiyasi. Transport tarmog‘idagi chorrahalar tugun, yo‘l kesimlari esa qirra sifatida ifodalanadi. Fazoviy bog‘liqlik qo‘shni yo‘l segmentlari orasidagi oqim ta’sirini, vaqtinchalik bog‘liqlik esa transport oqimining vaqt bo‘yicha evolyutsiyasini aks ettiradi. Umumlashtirilgan qirra og‘irligi formulasi quyidagicha aniqlanadi:

$$w_{ij}(t) = \alpha \cdot l_{ij} + \beta \cdot T_{ij}(t) + \gamma \cdot CI_{ij}(t) + \delta \cdot \tau_{ij}(t) \quad (1)$$

bu yerda l_{ij} — yo‘l uzunligi; $T_{ij}(t)$ — safar vaqti; $CI_{ij}(t)$ — tirbandlik indeksi; $\tau_{ij}(t)$ — kechikish vaqti [8].

2.2. Cheklangan sensorlar tarmog‘i: Rasmiy ta’rif

Mazkur tadqiqotda cheklangan sensorlar tarmog‘i deganda quyidagi ikkita kritik holat tushuniladi:

- **Fazoviy cheklanish:** Sensor qamrovi 50 foizdan kam bo‘lgan holat — ya’ni yo‘l tarmog‘ining yarmi va undan ko‘p qismiga statsionar sensorlar o‘rnatilmagan.
- **Vaqtinchalik cheklanish (Ma’lumotlar uzilishlari):** Vaqt qatorlarida (time-series) texnik nosozliklar tufayli 25 foizdan ortiq ma’lumotlar uzilishlari mavjud bo‘lgan sharoit. Ushbu ta’rif xalqaro adabiyotlardagi tushunchalarga to‘liq muvofiq keladi [9].

3. ALGORITMLAR TASNIFI VA BAHOLASH MEZONLARI.

3.1. Algoritmlarni tanlash va baholash mezonlari

Modellarni tahlil qilish uchun cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitiga moslashtirilgan beshta muhim ilmiy mezon tanlab olindi [3, 10]:

1. **Ma’lumotlar uzilishlariga barqarorlik:** Sensor signallari yo‘qolish darajasi 30–90% bo‘lganda model aniqligining (MAE) o‘zgarishi.
2. **Hisoblash murakkabligi va real vaqt mosligi:** inferens vaqti, parametrlar soni, chekka hisoblash qurilmalarida (Edge computing) ishga tushirish imkoniyati.
3. **Ko‘p manbali ma’lumot integratsiyasi:** GPS, CCTV va IoT qurilmalaridan kelayotgan har xil turdagi ma’lumotlarni fuziyalash qobiliyati.
4. **Dinamik grafga moslashuvchanlik:** qirra og‘irliklari real vaqtda yangilanishi imkoniyati.
5. **Yirik shahar miqyosida joriy etish imkoniyati:** 100 dan 500 gacha tugunga ega real yo‘l tarmoqlarida samarali ishlash qobiliyati.

Mazkur mezonlar asosida Dijkstra, TDSP, CTM, Kalman filtri, DCRNN, Graph WaveNet, MSTGACN va STAMImputer modellari tanlab olindi. Bu algoritmlar transport sohasining turli tarixiy bosqichlarini ifodalaydi: klassik

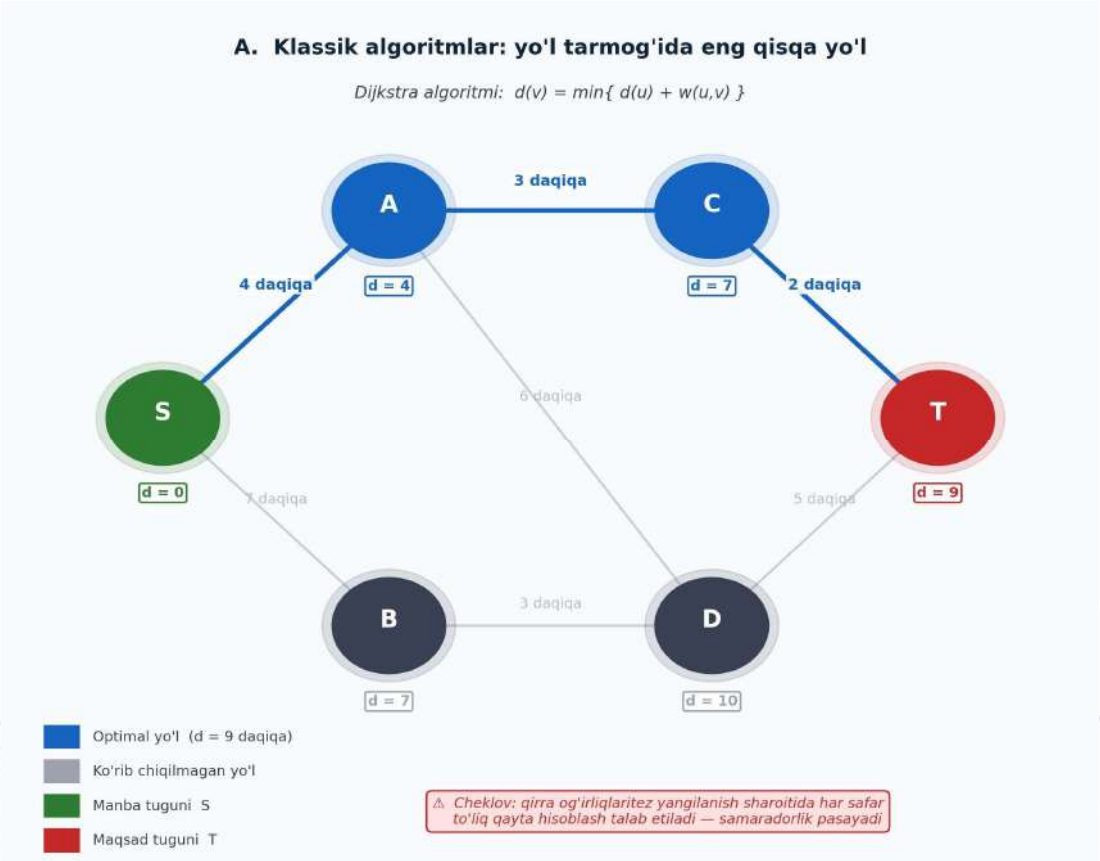
ISSN 3030-3907

(1959–2013), statistik (1994–hozir) va zamonaviy chuqur o’qitishga asoslangan (2018–2025).

3.2. Klassik graf algoritmlari

Dijkstra algoritmi $d(v) = min\{d(u) + w(u,v)\}$ rekurrent formulasi asosida O(V log V + E) vaqt murakkabligida ishlaydi [11]. Cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitidagi asosiy cheklov — sensor o‘rnatilmagan yo‘l kesimlarida qirra og‘irligi noma’lum bo‘lib, algoritmning to‘g‘ri ishlashi ta’minlanmaydi.

A* algoritmi $f(v) = g(v) + h(v)$ yo‘naltiruvchi baholash funksiyasi yordamida qidiruv trayektoriyasini to‘g‘ridan-to‘g‘ri maqsadli tugunga bog‘laydi va shu bois yirik miqyosli tarmoqlarda Deykstra (Dijkstra) usuliga nisbatan sezilarli hisoblash ustunligini namoyon etadi [12]. O‘z navbatida, TDSP (Time-Dependent Shortest Path) algoritmlarida qirra vazni $w(u,v,t_0)$ jo‘nash vaqtiga bog‘liq argument sifatida modellashtirilib, harakatning tig‘iz va minimal yuklamali soatlardagi davriy tebranishlarini aniq aks ettirish imkonini beradi [8]. Biroq, sensor ma’lumotlari yetishmovchiligi sharoitida har ikkala klassik algoritm ham dinamik qirra og‘irliklarini avtonom tarzda tiklash hamda tarmoq holatini interpolyatsiya qilish imkoniyatiga ega emas.



1-rasm. Dijkstra algoritmi — yo‘l tarmog‘ida eng qisqa yo‘l topish jarayoni: tugunlar, qirralar va optimal yo‘l

3.3. Statistik va fizikaviy modellar

ISSN 3030-3907

CTM (Cell Transmission Model) Lax-Hopf tenglamasini diskret shaklda ifodalaydi:

$$\rho(i,t+1) = \rho(i,t) + \Delta t/\Delta x \cdot [q(i-1,t) - q(i,t)]$$

Bu yerda ρ — zichlik, q — oqim [13]. Fundamental diagram $q = v \cdot \rho \leq Q_{max}$ orqali bog‘langan. Tarmoqdagi makroskopik bog‘liqlik oqimning fundamental diagrammasi orqali $q = v \cdot p \leq Q_{max}$ sharti asosida ifodalanadi. CTM makromodeli yo‘llardagi tirbandlik to‘lqinlari va to‘siqlar evolyutsiyasini modellashtirishda yuqori samaradorlik ko‘rsatsa-da, sensor ma’lumotlari yetishmovchiligi sharoitida fundamental diagrammaning empirik parametrlarini ishonchli kalibrlash va aniqlash imkoniyati keskin cheklanadi.

Kalman filtri esa transport tarmog‘i holatini baholashda ikki bosqichli iterativ hisoblash arxitekturasiga tayanadi:

1-bosqich — Bashorat qilish:

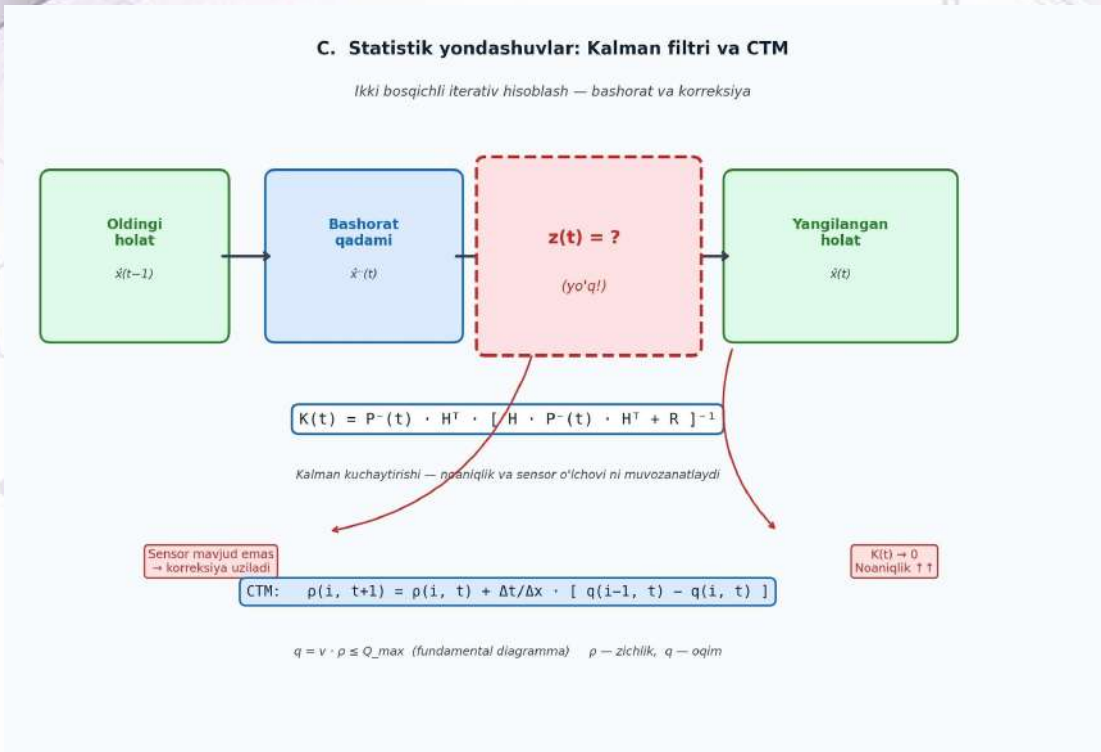
$$\widehat{x^{-}}(t) = F \cdot \hat{x}(t-1)$$

2-bosqich — Korreksiya va yangilanish:

$$\hat{x}(t) = \widehat{x^{-}}(t) + K(t) \cdot [z(t) - H \cdot \widehat{x^{-}}(t)]$$

Bu yerda *K(t)* — Kalman kuchaytirish koeffitsiyenti (Kalman gain), *z(t)* — sensorlar orqali olingan real o‘lchov ko‘rsatkichi [3]. Cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitida muayyan yo‘l segmentlarida o‘lchov ma’lumotlari mavjud bo‘lmaganda, filtrda korreksiya uzilishi sodir bo‘ladi, ya’ni $K(t) \to 0$ holatiga keladi. Natijada, tizim holatini baholash faqatgina yo‘naltiruvchi dinamik model bashoratiga tayanib qoladi va bu matematik noaniqlikning eksponensial ravishda ortishiga olib keladi. Aynan ushbu stoxastik cheklov Kalman filtrining cheklangan qamrovli muhitlarda qo‘llanilish samaradorligini keskin pasaytiradi.

ISSN 3030-3907

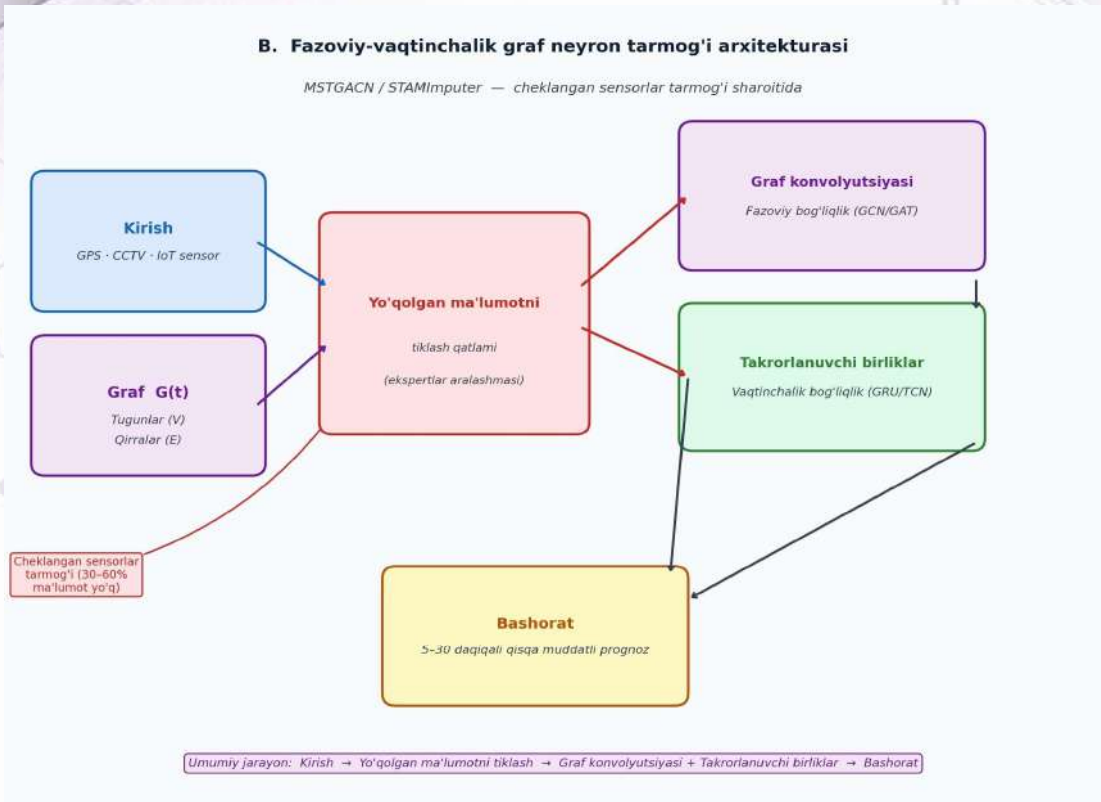


2-rasm. Kalman filtri ikki bosqichli iterativ sxemasi va cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitidagi korreksiya uzilishi

3.4. Fazoviy-vaqtinchalik graf neyron tarmoqlar

ST-GNN (Spatial-Temporal Graph Neural Networks) modellarida shahar transport infratuzilmasi topologik jihatdan funksional graf strukturasi ko‘rinishida ifodalanadi: bunda chorrahalar graf tugunlari V, yo‘l kesimlari esa ularni bog‘lovchi qirralar E hisoblanadi. Mazkur arxitekturada transport oqimining fazoviy bog‘liqliklari graf konvolyutsiyasi operatorlari yordamida, vaqtinchalik dinamik qonuniyatlari esa geytlangan takrorlanuvchi birliklar (GRU) yoki kengaytirilgan konvolyutsion tarmoqlar (Dilated Convolution) mexanizmlari orqali chuqur tahlil qilinadi va o‘rgatiladi. Jiang va Luo (2022) tomonidan taqdim etilgan tizimli ilmiy sharhda 2018–2021-yillar oralig‘ida yaratilgan 200 dan ortiq yetakchi GNN modellari tahlil qilingan bo‘lib, unda fazoviy-vaqtinchalik graf neyron tarmoqlari (ST-GNN) yondashuvi transport oqimlarini va davriy holat ko‘rsatkichlarini yuqori aniqlikda bashorat qilishda eng samarali metodologiya ekanligi ilmiy jihatdan tasdiqlangan [10].

ISSN 3030-3907



3-rasm. Fazoviy-vaqtinchalik graf neyron tarmog‘i (MSTGACN/STAMImputer) arxitekturasi

DCRNN modeli diffuzion konvolyutsiya orqali yo‘l tarmog‘ida trafik ma’lumotlarining ikki yo‘nalishda tarqalishini modellashtiradi. Normalizatsiyalangan o‘tish matritsasi $D^{-1}W$ asosida fazoviy bog‘liqlik o‘rganiladi [14]. Asosiy cheklov — to‘liq sensor qamrovi mavjudligi taxmin qilinishi.

MSTGACN — aynan cheklangan ma’umotlar uchun ishlab chiqilgan model. U transport trafigidagi uch xil davriylikni alohida komponentlarda o‘rganadi. Graph convolution qatlami: $H^{(l+1)} = \sigma(W^{l} \cdot \hat{A} \cdot H^{l} + b^{l})$, bu yerda $\hat{A} = D^{(-1/2)} \cdot A \cdot D^{(-1/2)}$ — normalizatsiyalangan qo’shnilik matritsasi. Liu va boshq. (2021) tadqiqotida 88,4% sensor yo‘qolishida MAE = 3,22 ko‘rsatildi — bu shu sharoitda DCRNN ning MAE = 3,64 natijasidan sezilarli yaxshi [9].

STAMImputer ekspertlar aralashmasi (MoE) mexanizmidan foydalanib, bloklangan ma’lumot yo‘qolishini tiklaydi. E’tibor mexanizmi (Attention): $\text{Attention}(Q,K,V) = \text{softmax}(QK^{T}/\sqrt{d_k}) \cdot V$. 60% bloklangan yo‘qolish sharoitida NYC-Taxi da MAE = 5,34 — amaliy joriy etish uchun qabul qilinarli chegara [15].

Zhou va boshq. (2024) tomonidan taklif qilingan Dirichlet Graph Auto-Encoder (DGAE) modeli sensor o‘rnatilmagan yo‘l kesimlarida trafik holatini grafik qo‘shni ma’lumotlaridan tiklaydi. 1000 ta segmentli katta tarmoqda sparse

ISSN 3030-3907

data sharoitida ishonchli natija ko‘rsatilgan bo‘lib, bu model shahar miqyosidagi TSE uchun yangi perspektiv yo‘nalishni ifodalaydi [16].

4. Algoritmlarning beshta mezon bo‘yicha qiyosiy tahlili

1-jadvalda 3-bo‘limda belgilangan beshta mezon bo‘yicha barcha algoritmlarning qiyosiy baholash natijalari keltirilgan. Har bir katakchadagi baho adabiyotlarda keltirilgan empirik natijalar va nazariy tahlil asosida shakllantirilgan.

1-jadval.

Algoritmlarning beshta mezon bo‘yicha qiyosiy baholash jadvali

Algoritm	Murakkablik	Sparse data	Ko‘p manba	Real vaqt	Din. og‘irlik	Umumiy baho
Dijkstra	O(V log V+E)	Yo‘q	Yo‘q	Qisman	Ha (modif.)	Past
TDSP	O‘rta	Yo‘q	Yo‘q	Ha	Ha	O‘rta
CTM	O(N·T)	Qisman	Yo‘q	Ha	Ha	O‘rta
Kalman filtri	O(n^2)	Ha (<50%)	Qisman	Ha	Ha	O‘rta
DCRNN	Yuqori	Yo‘q	Qisman	Yo‘q	Ha	Past
Graph WaveNet	O‘rta	Yo‘q	Yo‘q	Qisman	Ha	O‘rta-past
MSTGACN	O‘rta	Ha (88%)	Qisman	Ha	Ha	Yuqori
STAMImputer	O‘rta	Ha (60%)	Ha	Ha	Ha	Juda yuqori

Jadval natijalari shuni ko‘rsatadiki, klassik grafik algoritmlar beshta mezondan eng ko‘pi ikkitasini qondira oladi. CTM va Kalman filtri sparse data bilan qisman ishlashi mumkin, lekin ko‘p manbali integratsiyada zaif. Faqat MSTGACN va STAMImputer to‘rtta va beshta mezonni bir vaqtda qondiradi — bu ularni cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitida trafik holatini baholash uchun eng mos sinfga kiritadi.

5. Cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitida raqamli taqqoslama

2-jadvalda tanlangan modellarning xalqaro namunaviy datasetlardagi raqamli natijalari keltirilgan. Barcha qiymatlar original tadqiqotlarda chop etilgan natijalar asosida tuzilgan.

ISSN 3030-3907

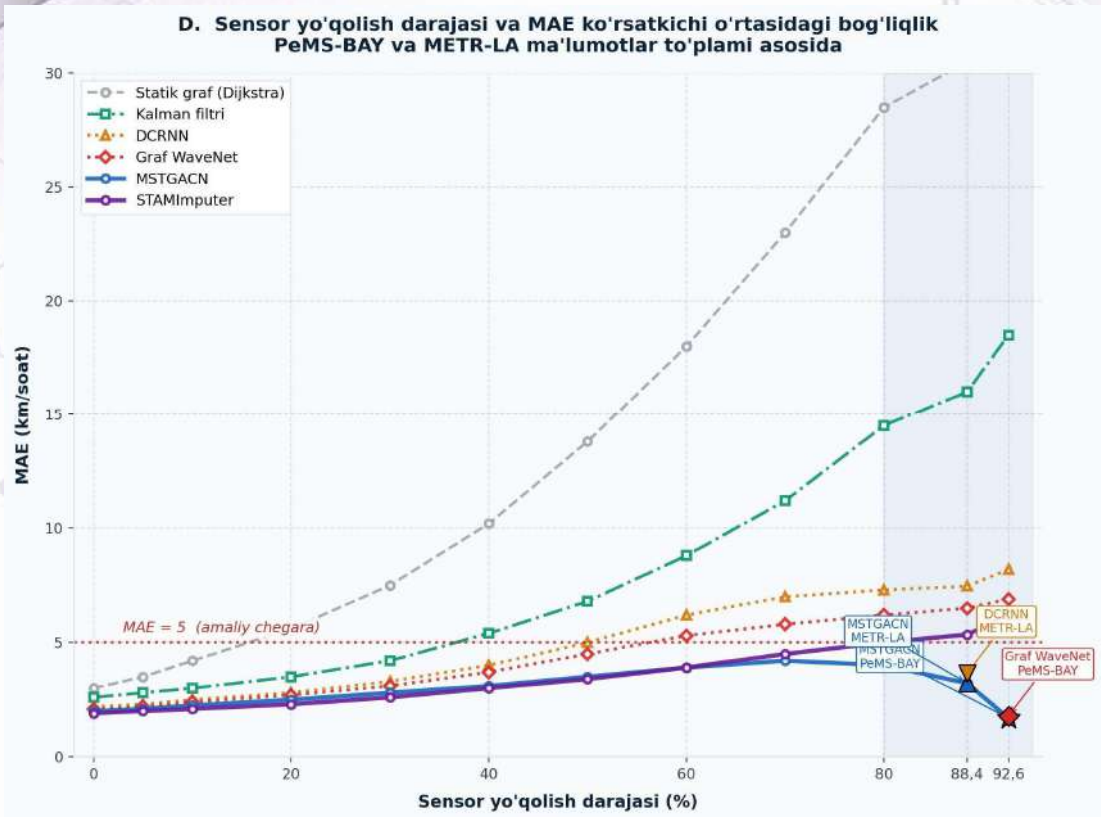
2-jadval.

Cheklangan sensorlar tarmog'i sharoitida algoritmlar samaradorligi

Algoritm	Ma'lumotlar to'plami	Sensor yo'qolishi	MAE	RMSE	Asosiy cheklov (manba)
MSTGACN	PeMS-BAY (24/325)	92,6%	1,70	3,90	Ob-havo va hodisalar hisobga olinmagan [9]
MSTGACN	METR-LA (24/207)	88,4%	3,22	6,47	Real vaqt anomaliyalarini e'tiborsiz qoldiradi [9]
Graph WaveNet	PeMS-BAY (24/325)	92,6%	1,79	4,21	Fazoviy bog'liqlik bir marta hisoblanadi [14]
DCRNN	METR-LA (24/207)	88,4%	3,64	7,46	Gradient portlashi, cheklangan qamrov sharoitida barqarorligi past [14]
STAMImputer	PeMSD8	25%	11,41	—	Turg'un bo'lmagan trafik taqsimotida moslikni yo'qotishi [15]
STAMImputer	NYC-Taxi	60%	5,34	—	Ko'p manbali ma'lumot integratsiyasi mavjud emas [15]
DGAE (Zhou, 2024)	Katta tarmoq 1000 seg.	Yuqori (tabiiy)	Raqobatbardosh	—	Urban miqyosda sparse TSE uchun yangi perspektiv [16]

Raqamli natijalar tahlilidan ko'rinib turibdiki, sensor yo'qolishi 30 foizdan oshganda klassik modellar MAE ko'rsatkichida keskin yomonlashadi. MSTGACN modeli 88–92% sensor yo'qolishi sharoitida DCRNN va Graph WaveNet modellariga nisbatan barqarorroq ishlashini ko'rsatadi — MAE da 12,1 foizga yaxshi natija (3,22 vs 3,64 METR-LA da). STAMImputer esa 60% bloklangan yo'qolish sharoitida ham amaliy chegarada (MAE < 6) ishlash imkoniyatini saqlab qoladi [9, 15]. Cheklangan sensorlar tarmog'i sharoitida shahar trafik holatini baholash masalasida ko'p manbali grafga asoslangan yondashuvlar eng istiqbolli yo'nalish sifatida baholandi.

ISSN 3030-3907



4-rasm. Sensor yo‘qolish darajasi va MAE ko‘rsatkichi o‘rtasidagi bog‘liqlik (PeMS-BAY / METR-LA)

6. O‘rta hajmli shaharlar uchun algoritmni tanlash tavsiyasi

O‘zbekiston shaharlari uchun uchta asosiy cheklov mavjud: sensor qamrovi 30–50%, hisoblash resurslari cheklangan (chekka qurilmalar), ma’lumot manbalari xilma-xil (avtobus GPS, taksi GPS, CCTV). Bu cheklovlar asosida quyidagi tavsiya shakllantiriladi:

MSTGACN — sparse coverage sharoitida dastlabki bosqich uchun optimal tanlov. METR-LA va PeMS-BAY ochiq datasetlarida sozlanib, Toshkent/Urganch avtobus GPS ma’lumotlari bilan moslashtiruvchi qayta o‘qitish orqali moslashtirilishi mumkin.

STAMImputer — bloklangan ma’lumot yo‘qolishi keng tarqalgan hududlarda (masalan, tungi soatlar) yoki kamera uzilishlari tez-tez yuz beradigan tarmoq qismlarida qo‘llash uchun maqbul.

Kalman filtri yordamchi modul — real vaqtda sensor uzilishini tezda aniqlash va GNN modeliga signal berish uchun yengil qo‘shimcha komponent sifatida.

Kelgusidagi tadqiqotda MSTGACN asosida ko‘p manbali vaznlashtirilgan graf tizimi modeli ishlab chiqilishi rejalashtirilgan. Ushbu tizim modeli avtobus GPS, taksi GPS va CCTV ma’lumotlarini har manba uchun ishonchlilik og‘irligi berish orqali yagona dinamik grafga birlashtiradi va Toshkent/Urganch shaharlarida joriy etish uchun moslashtiriladi.

ISSN 3030-3907

7. XULOSA.

Mazkur maqolada cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitida shahar transport tarmoqlarida trafik holatini baholashning grafga asoslangan yondashuvlari beshta ilmiy mezon asosida qiyosiy tahlil qilindi. Tahlil uchta asosiy xulosani beradi.

Birinchi xulosa: klassik grafik algoritmlar (Dijkstra, TDSP) marshrutlashtirish uchun samarali bo‘lsa-da, sensor yo‘qolishi 30 foizdan oshganda trafik holatini baholashda samarasiz bo‘lib qoladi — beshta mezondan ikki yoki uchtasini qondira oladi.

Ikkinchi xulosa: MSTGACN modeli 88–92% sensor yo‘qolishi sharoitida ham DCRNN va Graph WaveNet modellariga nisbatan barqarorroq ishlashini ko‘rsatdi: PeMS-BAY ma’lumotlar to‘plamida MAE = 1,70 (DCRNN — 3,64), METR-LA da MAE = 3,22 (DCRNN — 3,64). STAMImputer esa 60% bloklangan yo‘qolishda ham MAE = 5,34 bilan amaliy chegarada ishladi.

Uchinchi xulosa: cheklangan sensorlar tarmog‘i sharoitida shahar trafik holatini baholash masalasida ko‘p manbali grafga asoslangan yondashuvlar eng istiqbolli yo‘nalish sifatida baholandi. Kelgusida MSTGACN asosidagi ko‘p manbali vaznlashtirilgan graf tizim modeli ishlab chiqilishi va O‘zbekiston shaharlari real ma’lumotlari asosida sinovdan o‘tkazilishi ko‘zda tutilgan.

ADABIYOTLAR

1. Natterer E., Loder A., Bogenberger K. Graph neural network approach to predict the effects of road capacity reduction policies // Transportation Research Board 104th Annual Meeting. — Washington D.C., 2024. — 18 p.
2. Prezident farmoni. Toshkentda 255 ta chorrahadagi svetofor tizimini intellektuallashtirish to‘g‘risida. — Toshkent, 2024.
3. Xing J., Wu W., Cheng Q., Liu R. Traffic state estimation of urban road networks by multi-source data fusion: Review and new insights // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2022. — Vol. 595. — P. 127079.
4. Muxamedov M.R., Tojiboyev T. Forecasting Traffic Flow Using Machine Learning Algorithms // MDPI Engineering Proceedings (EEPES’24). — Kavala, Greece, 2024.
5. Spatio-Temporal Traffic Congestion Forecasting in Tashkent City Using a CNN-LSTM Deep Learning Model // Pioneering Studies and Theories. — 2025. — Vol. 1, No. 6.
6. Hamzayev J.F. Trafik oqimlariga intellektual ishlov berish algoritmlari va dasturiy majmuasini ishlab chiqish: PhD dissertatsiyasi. — Toshkent: TATU, 2025. — 152 b.

ISSN 3030-3907

8. Allamov O.T. Graflar nazariyasi asosida marshrutlarni tanlash masalasini yechish usul va algoritmlari: PhD dissertatsiyasi. — Toshkent: TATU, 2018. — 139 b.
9. Ferone D., Festa P., Napoletano A., Pastore T. Shortest paths on dynamic graphs: A survey // Pesquisa Operacional. — 2017. — Vol. 37(3). — P. 487–508.
10. Liu S., Dai S., Sun J., Mao T., Zhao J., Zhang H. Multicomponent Spatial-Temporal Graph Attention Convolution Networks for Traffic Prediction with Spatially Sparse Data // Computational Intelligence and Neuroscience. — 2021. — ID 9134942.
11. Jiang W., Luo J. Graph neural network for traffic forecasting: A survey // Expert Systems with Applications. — 2022. — Vol. 207. — P. 117921.
12. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. — 1959. — Vol. 1. — P. 269–271.
13. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. — 1968. — Vol. 4(2). — P. 100–107.
14. Daganzo C.F. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic // Transportation Research Part B. — 1994. — Vol. 28(4). — P. 269–287.
15. Li Y., Yu R., Shahabi C., Liu Y. Diffusion convolutional recurrent neural network: Data-driven traffic forecasting // ICLR. — Vancouver, 2018. — 16 p.
16. Wang Y., Peng H., Wang S., Du H., Liu C., Wu J., Wu G. STAMImputer: Spatio-Temporal Attention MoE for Traffic Data Imputation // Proceedings of IJCAI-2025. — Montreal, 2025.
17. Zhou Q., Zhang Y., Makridis M., Kouvelas A., Wang Y., Hu S. Network-wide freeway traffic estimation using sparse sensor data: A Dirichlet graph auto-encoder approach // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2024.
18. Fang C. et al. The analysis of impact on the performance of traffic prediction models brought by missing data // International Journal of Intelligent Transportation Systems Research. — 2025. — DOI: 10.1007/s13177-025-00540-6.