JAHON VA RESPUBLIKA TAJRIBASIDA KO‘PRIKLARNING EKSPLUATATSIYA SAMARADORLIGINI TA’MINLASH YONDASHUVLARI.

Asanova Guljanat Orinbekovna
Toshkent Davlat Transport Universiteti
Saatova Nodira Ziyayevna
Toshkent Davlat Transport Universiteti

Annotatsiya. Ko‘priklar transport tizimining asosiy bo‘g‘ini bo‘lib, ularning samarali ekspluatatsiyasi iqtisodiyot, logistika va harakat xavfsizligiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Rivojlangan davlatlarda so‘nggi yillarda BMS, LCC, SHM, raqamli egizaklar va sun’iy intellektga tayangan boshqaruv modellari keng rivojlanmoqda [1–7]. Maqolada ushbu yondashuvlar O‘zbekiston amaliyoti bilan solishtiriladi va milliy sharoit uchun mos integratsiya modeli taklif etiladi. Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, respublikada ko‘priklar asosan vizual ko‘prik va rejali ta’mirlash asosida boshqarilib, BMS, LCC va SHM faqat qisman qo‘llanmoqda. Taklif etilgan model milliy BMS, riskga asoslangan LCC hamda pilot SHM va raqamli egizak loyihalari orqali ekspluatatsiya samaradorligini oshirishni ko‘zda tutadi.

Kalit so‘zlar: ko‘priklar ekspluatatsiyasi, Bridge Management System (BMS), Life-Cycle Cost (LCC), Structural Health Monitoring (SHM), raqamli egizak, sun’iy intellekt.

Abstract. Bridges are key components of the transport system, and their efficient operation directly influences economic activity, logistics stability, and traffic safety. In recent years, advanced countries have widely adopted bridge management approaches based on BMS, LCC, SHM, digital twins, and artificial intelligence [1–7]. This paper compares these modern approaches with current practices in Uzbekistan and proposes an integration model suitable for national implementation. Literature analysis shows that bridge maintenance in the country relies mainly on visual inspection and scheduled repairs, while BMS, LCC, and SHM are applied only partially. The proposed model aims to enhance operational efficiency through the introduction of a national BMS, risk-based LCC methodology, and pilot SHM and digital twin systems.

Keywords: bridge operation, Bridge Management System (BMS), Life-Cycle Cost (LCC), Structural Health Monitoring (SHM), digital twin, artificial intelligence.

Аннотация. Мосты являются важным звеном транспортной системы, и эффективность их эксплуатации напрямую влияет на экономическую активность, устойчивость логистики и безопасность движения. В последние годы в развитых странах активно внедряются модели управления мостами, основанные на BMS, LCC, SHM, цифровых двойниках и искусственном

ISSN 3030-3907

интеллекте [1–7]. В статье данные современные подходы сопоставляются с практикой Узбекистана и предлагается интеграционная модель, адаптированная к национальным условиям. Анализ литературы показывает, что эксплуатация мостов в республике в основном основана на визуальных обследованиях и плановом ремонте, а использование BMS, LCC и SHM остается частичным. Предлагаемая модель направлена на повышение эффективности эксплуатации мостов путем внедрения национальной BMS, риск-ориентированного подхода LCC и пилотных систем SHM и цифровых двойников.

Ключевые слова: эксплуатация мостов, Bridge Management System (BMS), Life-Cycle Cost (LCC), Structural Health Monitoring (SHM), цифровой двойник, искусственный интеллект.

Kirish.

Ko‘priklar avtomobil va temir yo‘l tarmoqlarining uzluksizligini ta’minlaydigan asosiy sun’iy inshootlar bo‘lib, ularning ishonchli ishlashi milliy iqtisodiyot va mintaqaviy tranzit tizimi uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega. XX asrning ikkinchi yarmida qurilgan ko‘plab ko‘priklar bugungi kunda loyihaviy xizmat muddatiga yaqinlashgan, yuk oqimining ortishi, transport vositalari massasi va tezligi ko‘payishi natijasida ekspluatatsion yuklanish keskin oshgan [1,4].

Yirik ko‘prik avariyalari, xususan 2024 yilda AQShda Francis Scott Key ko‘prigining kema urilishi oqibatida qulash hodisasi, ko‘priklar ekspluatatsiyasini faqat konstruktiv mustahkamlik emas, balki kompleks xavf boshqaruvi, real vaqt monitoringi va tashqi xavf manbalarini ham inobatga olish zarurligini yana bir bor isbotladi [13–15]. Bu voqea ortidan AQShda ko‘priklar uchun vessel-strike xavfi va tizim zaifliklarini baholash bo‘yicha keng kampaniya boshlangan [13–16].

Rivojlangan davlatlarda ko‘priklarning ekspluatatsiya samaradorligini ta’minlash BMS, SHM, LCC, raqamli egizaklar, ma’lumotlarga asoslangan texnik xizmat ko‘rsatish va riskga asoslangan qaror qabul qilish tizimlari uyg‘unligiga asoslanadi [1–7,16,17]. O‘zbekiston uchun ham transport infratuzilmasi, jumladan ko‘priklar fondining eskirib borayotgani, iqlim o‘zgarishi, gidrologik va seysmik xavflar fonida zamonaviy ekspluatatsiya modeliga o‘tish dolzarb masala sifatida namoyon bo‘lmoqda [8–12,24].

MATERIALLAR VA METODLAR

Tadqiqot so‘nggi yillarda nashr etilgan ilmiy maqolalar, sharhlar va xalqaro tashkilotlar hisobotlari asosida olib borildi. Asosiy guruhlar:

- BMSning evolyutsiyasi va amaliyoti bo‘yicha ishlanmalar [1–3,17];
- SHM, datchik texnologiyalari va sun’iy intellekt integratsiyasi bo‘yicha ilmiy ishlar [4,6,7,18,21];

ISSN 3030-3907

- raqamli egizak kontseptsiyasi va ko‘prik ekspluatatsiyasidagi qo‘llanilishi [3,5,6,19,20];
- LCC va riskga asoslangan iqtisodiy baholash modellari [4,22,23];
- O‘zbekiston transport infratuzilmasi, yo‘l va ko‘priklar holati bo‘yicha ADB, AIIB, CAREC va boshqa xalqaro hisobotlar [8–12,24];
- yirik ko‘prik avariyalari va xavfsizlik bo‘yicha tavsiyalar (NTSB va boshqa tashkilotlar hujjatlari) [13–16].

Tahlil metodologiyasi. Metodologiya uch asosiy bosqichni o‘z ichiga oldi:

1. ***Tizimli adabiyot tahlili.*** BMS, SHM, LCC, raqamli egizaklar, xavf tahlili va ko‘prik ekspluatatsiyasi bo‘yicha kalit tushunchalar va tendensiyalar ajratib olindi.
2. ***Mezonli taqqoslash.*** Jahon va O‘zbekiston amaliyoti quyidagi mezonlar bo‘yicha solishtirildi:
   - ma’lumotlar bazasining raqamlashtirilish darajasi;
   - BMS mavjudligi va funksional imkoniyatlari;
   - SHM va raqamli egizaklar joriy etilishi;
   - LCC va riskga asoslangan rejalashtirish;
   - normativ-huquqiy baza va moliyalashtirish mexanizmlari.
3. ***Kontseptual modellashtirish.*** O‘zbekiston sharoitiga mos integratsiya modeli ishlab chiqildi. Model uch blokdan iborat qilib loyihalashtirildi:
   - texnik blok (SHM, datchiklar tarmog‘i, raqamli egizaklar);
   - iqtisodiy blok (LCC, egasi va foydalanuvchi xarajatlari tahlili);
   - tashkiliy-huquqiy blok (milliy BMS, normativ talablar, riskga asoslangan ekspluatatsiya).

Metodlar majmuasiga qiyosiy tahlil, ekspert yondashuvi, “bo‘shliq” (gap) tahlili va konseptual diagramma usuli kiradi.

NATIJALAR

Jahon tajribasi bo‘yicha natijalar.

BMSning rivojlanish tendensiyalari.

Brighenti va hammualliflar [1] BMSni uch avlodga ajratadi:

1-avlod – inventarizatsiya va pasportlashtirish;

2-avlod – texnik holatni ballik baholash va ta’mirlashni prioritetlashtirish;

3-avlod – LCC, SHM va risk tahlilini integratsiya qilgan aqlli tizimlar.

Ko‘plab Yevropa va Osiyo davlatlarida 3-avlod BMS elementlari amaliyotga joriy etilgan: ko‘priklarning funksional ahamiyati, tranzit roli, avariya oqibatlari, foydalanuvchi xarajatlari hisobga olingan holda rekonstruksiya va ta’mirlash strategiyalari optimallashtiriladi [2,3,17].

Strukturaviy sog‘liq monitoringi va sun’iy intellekt.

Elsisi va hammualliflar [18] hamda Zhang va boshqalar [21] SHM bo‘yicha so‘nggi yillarda amalga oshirilgan ishlarni tahlil qilib, datchik texnologiyalari

ISSN 3030-3907

(tezlanish, deformatsiya, tolali optik datchiklar, temperatura va namlik datchiklari), signallarni qayta ishlash usullari va mashinaviy o‘rganish algoritmlarining rivojlanishini ko‘rsatadi. Prakash va hammualliflar [7] beton ko‘priklar SHMida sun’iy intellekt asosidagi zarar aniqlash va resursni prognozlash algoritmlarining aniqligi yuqori ekanini ta’kidlaydi.

SHM tizimlari yordamida konstruktsiyadagi nuqsonlarni erta aniqlash, yuklanishdagi o‘zgarishlarga sezgir javob qayd etish va ko‘prikning qolgan xizmat muddatini ehtimollik yondashuvi asosida baholash imkoniyati yaratiladi [4,6,7,18,21].

Raqamli egizaklar va ekspluatatsiya modeli.

Sun [5], Jeon [6] va Jirawattanasomkul [19] ishlarida ko‘priklar uchun raqamli egizak (digital twin) konsepsiyasi ishlab chiqilgan: real ko‘prikning uch o‘lchamli raqamli modeli, SHM datchiklaridan uzatilayotgan real vaqt ma’lumotlari va hisoblash modellarini birlashtirish orqali raqamli egizak barpo etiladi. Bunday tizimlar:

- yuklanish ssenariylarini sinash;
- avariya xavfini baholash;
- ta’mirlash va rekonstruksiya vaqtini optimallashtirish;
- “agar shunday bo‘lsa” tipidagi ssenariylar (kema zarbasi, seysmik ta’sir, ekstremal harorat)ni modellashtirish imkonini beradi [3,5,6,19,20].

LCC va riskga asoslangan iqtisodiy tahlil.

Milich va hammualliflar [4] LCC tahlilida ko‘prik egasi xarajatlari (qurilish, ta’mirlash, demontaj) bilan birga foydalanuvchi xarajatlarini ham (tirbandlik, yoqilg‘i sarfi, yo‘l yopilishi natijasidagi yo‘qotishlar) hisobga olish zarurligini asoslaydi. Huber [22] integral yo‘l ko‘prigini turli mustahkamlovchi materiallar bilan solishtirib, boshlang‘ich qurilish qiymati nisbatan yuqori bo‘lgan, lekin butun hayotiy sikl davomida kamroq xarajat talab qiladigan yechimlarning afzal bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatadi. Lee va hammualliflar [23] esa iqlim o‘zgarishi sharoitida ko‘priklarning LCC va ekologik ta’sirini riskga asoslangan model orqali baholaydi.

O‘zbekiston tajribasi bo‘yicha natijalar.

ADB va CAREC hisobotlariga ko‘ra, O‘zbekistonning avtomobil yo‘llari tarmog‘i 40 ming km dan ortiq respublika ahamiyatidagi yo‘llarni, temir yo‘l tarmog‘i esa mintaqaviy tranzit yo‘nalishlarida muhim o‘rin tutadigan ko‘priklarni o‘z ichiga oladi [8–10]. AIIB va ADBning bir qator loyihalarida yo‘l va ko‘priklarni rekonstruksiya qilish, suv o‘tkazgich inshootlarni, drenaj va eroziyaga qarshi himoya choralarini kuchaytirish ko‘zda tutilgan [8–12,24].

Tahlil natijalariga ko‘ra, O‘zbekistonda ko‘priklarni ekspluatatsiya qilish tizimida quyidagi xususiyatlar mavjud:

ISSN 3030-3907

• ko‘priklar pasportlari mavjud, biroq ular yagona milliy BMS formatida raqamlashtirilmagan;
• ko‘priklarning texnik holatini baholash asosan vizual inspeksiya va cheklangan statik sinovlarga tayanadi;
• SHM va raqamli egizak tizimlari hozircha ayrim pilot tashabbuslar darajasida, markazlashgan konsepsiya shakllanmagan;
• LCC va riskga asoslangan rejalashtirish mexanizmlari amaliyotda deyarli qo‘llanilmaydi;
• moliyalashtirish ko‘pincha “reaktiv” xarakterga ega, ya’ni jiddiy nuqson aniqlangandan so‘ng ajratiladi [8–12,24].

MUHOKAMA

Jahon tajribasi bilan taqqoslaganda, O‘zbekiston ko‘priklar ekspluatatsiyasi tizimida bir qator kamchiliklar mavjud:

1. **Ma’lumotlar bazasi va BMS yetishmasligi.** Yagona milliy BMS yo‘qligi ko‘priklar bo‘yicha ma’lumotlarni tizimli yig‘ish, tahlil qilish va ta’mirlashni prioritetlashtirishni qiyinlashtiradi. Ilg‘or davlatlarda BMS ko‘priklarning holati, yuklanish, ahamiyat darajasi va xavf ko‘rsatkichlarini integrallashgan holda baholash imkonini beradi [1–3,17].

2. **Monitoring va diagnostika texnologiyalarining cheklanganligi.** SHM tizimlari yo‘qligi sababli ko‘prik konstruksiyalaridagi yashirin nuqsonlar va sekin rivojlanayotgan shikastlanishlar o‘z vaqtida aniqlanmasligi mumkin. Vizual inspeksiya natijalari esa ko‘p jihatdan sub’ektiv bo‘lib qoladi [4,6,7,18,21].

3. **Iqtisodiy modelning “qisqa ufqli”ligi.** LCC modellarining qo‘llanmasligi natijasida qisqa muddatda eng arzon bo‘lib ko‘ringan konstruktiv yechimlar uzoq muddatda katta ekspluatatsion va ta’mirlash xarajatlariga olib kelishi mumkin [4,22,23].

4. **Normativ-huquqiy baza va xavf tahlilining yetarli darajada integratsiyalanmaganligi.** BMS, SHM, raqamli egizaklar va LCCga oid aniq talablar, shuningdek vessel-strike, seysmiklik, eroziya va ekstremal yuk ssenariylarini majburiy modellashtirish bo‘yicha me’yoriy hujjatlar to‘liq shakllanmagan.

O‘zbekiston sharoitiga mos, jahon tajribasiga tayangan holda quyidagi integratsiya modeli taklif etiladi:

Milliy BMS platformasi.

• avtomobil va temir yo‘l ko‘priklarini yagona raqamli reyestrga kiritish;
• har bir ko‘prik uchun holat indeksi, xavf reytingi va funksional ahamiyat ko‘rsatkichini joriy etish;
• LCC va risk tahlili modullarini BMS tarkibiga integratsiya qilish [1–4,17,22,23,16].

ISSN 3030-3907

SHM va raqamli egizaklar.

- strategik ahamiyatga ega 5–10 ta ko‘prikda pilot SHM tizimlarini (datchiklar tarmog‘i, ma’lumotlarni yig‘ish va qayta ishlash serverlari) o‘rnatish;
- ushbu ko‘priklar uchun raqamli egizaklar yaratib, yuklanish ssenariylarini modellashtirish, nuqsonlar rivojlanishini kuzatish va ekspluatatsiya qarorlarini qo‘llab-quvvatlash;
- bosqichma-bosqich boshqa yirik ko‘priklarni ham SHM va raqamli egizak tizimlariga qo‘shish [3,5,6,19,20].

LCC va riskga asoslangan rejalashtirish.

- yangi ko‘prik loyihalari va yirik rekonstruksiyalarda LCCni asosiy iqtisodiy mezon sifatida belgilash;
- egasi va foydalanuvchi xarajatlarini (tirbandlik, aylanma yo‘llar, avariya xavfi) integrallashgan holda modellashtirish;
- iqlim o‘zgarishi, gidrologik va seysmik xavflarni LCC modeliga kiritish [4,22,23].

Normativ-huquqiy va institutsional islohotlar.

- ko‘priklar ekspluatatsiyasi bo‘yicha me’yoriy hujjatlarga BMS, SHM, LCC va raqamli egizaklar bo‘yicha talablarni kiritish;
- yirik ko‘priklar uchun vessel-strike, daryo o‘zanining yuvilishi, seysmik ta’sir va ekstremal yuk ssenariylarini majburiy ravishda baholashni joriy etish [13–16];
- BMS va SHM ma’lumotlari asosida byudjet mablag‘larini taqsimlash mexanizmlarini yo‘lga qo‘yish.

Kadrlar va ilmiy salohiyat.

- texnik oliy ta’lim muassasalarida “Ko‘priklarni boshqarish tizimlari”, “Strukturaviy sog‘liq monitoringi”, “Raqamli egizaklar va sun’iy intellekt” kabi maxsus kurslar ochish;
- xalqaro ilmiy hamkorlikda BMS, SHM va LCC bo‘yicha qo‘shma laboratoriyalar va pilot loyihalarni yo‘lga qo‘yish [4,6,7,18,21].

Amalga oshirish bosqichlari. Modelni amaliyotga joriy etish quyidagi bosqichlarda amalga oshirilishi maqsadga muvofiq:

- **Qisqa muddat (1–3 yil):** inventarizatsiyani to‘liq raqamlashtirish, BMS konsepsiyasini ishlab chiqish, normativ bazani tayyorlash, 1–2 ta pilot SHM loyihasini boshlash.
- **O‘rta muddat (3–7 yil):** BMSni ishga tushirish, LCCni yirik loyihalar uchun majburiy mezonga aylantirish, SHM tizimlarini boshqa muhim ko‘priklarga kengaytirish.

ISSN 3030-3907

• **Uzoq muddat (7+ yil):** raqamli egizaklar va AI asosidagi prognozlovchi ekspluatatsiya modeliga o‘tish, ko‘priklar fondining sezilarli qismini SHM bilan qamrab olish.

XULOSA.

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, jahon amaliyotida ko‘priklarning ekspluatatsiya samaradorligi BMS, SHM, LCC, raqamli egizaklar va riskga asoslangan yondashuvlar sinergiyasi orqali ta’minlanmoqda. O‘zbekistonda esa ko‘priklarni ekspluatatsiya qilish bo‘yicha an’anaviy tajriba mavjud bo‘lsa-da, ushbu zamonaviy yondashuvlar hozircha fragmentar va cheklangan ko‘lamda qo‘llanilmoqda.

Taklif etilgan integratsiya modeli – milliy BMS platformasi, pilot SHM va raqamli egizaklar, LCC asosidagi iqtisodiy baholash hamda normativ-huquqiy islohotlarni birlashtirgan holda – O‘zbekiston ko‘priklari ekspluatatsiyasini jahon standartlariga mos darajada modernizatsiya qilish uchun konseptual asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin. Modelni bosqichma-bosqich amalga oshirish ko‘priklar ekspluatatsiya xarajatlarini optimallashtirish, xavfsizlikni oshirish va transport tizimining uzoq muddatli barqarorligini ta’minlashga yordam beradi.

ADABIYOTLAR

1. Brighenti F., et al. Bridge management systems: A review on current practice and research needs. *Engineering Structures*, 2024.
2. Bridge management systems: an overview and comparison. 2023.
3. Costin A., et al. A digital twin framework for bridge structural health monitoring. *Transportation Research Record*, 2024.
4. Milić I., et al. Life cycle assessment of the sustainability of bridges. *Frontiers in Built Environment*, 2024.
5. Sun Z., et al. Approach towards the development of digital twin for civil infrastructure. *Sensors*, 2024.
6. Jeon C. H. Review of digital twin research trends for bridge maintenance. *Journal of Construction Safety Management Systems*, 2024.
7. Prakash V., et al. Structural health monitoring of concrete bridges through artificial intelligence: A review. 2025.
8. Asian Development Bank. *Uzbekistan: National Road Development Project – Initial Environmental Examination*, 2021.
9. Asian Development Bank. *Road Subsector Development Strategy and Action Plan – Uzbekistan*, 2022.
10. CAREC. *The Situation of Railways in CAREC Countries*, 2022.
11. AIIB. *Uzbekistan KK Road Project – Project Document*, 2025.
12. Uzbekistan Railways / ADB. *Environmental Monitoring Reports for Railway Projects*, turli yillar.

ISSN 3030-3907

13. NTSB. *Safeguarding Bridges from Vessel Strikes: Need for Assessment*, 2025.
14. Francis Scott Key Bridge collapse bo‘yicha ochiq manbalar va rasmiy xulosalar, 2024–2025.
15. NTSB. Press releases on vulnerability assessment of 68 U.S. bridges, 2025.
16. OECD/ITF. *Data-driven transport infrastructure maintenance*, 2021–2023.
17. Bridge Management System case study (Pizzighettone Bridge). SSRN working paper, 2024.
18. Elsisi A., et al. A comprehensive review of structural health monitoring of steel bridges. *Applied Sciences / Preprints*, 2025.
19. Jirawattanasomkul T., et al. Digital twin-based structural health monitoring and maintenance of bridges. *Journal of Infrastructure Preservation*, 2025.
20. Kaveh H., et al. Advancing civil infrastructure with digital twins: a review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2025.
21. Zhang B., et al. Review and prospect of research on structural health monitoring of bridges. 2024.
22. Huber T., et al. Holistic life cycle cost analysis of road bridges with non-conventional reinforcement. *Structures*, 2024.
23. Lee S. H., et al. Risk-based bridge life cycle cost and environmental impact assessment under climate change. *Scientific Reports*, 2025.
24. Asian Development Bank. *Road Maintenance Financing and Cost Recovery Options*, 2021.

ISSN 3030-3907