



OPTIK TOLALI MONITORING TIZIMI MA'LUMOTLARI ASOSIDA KO'PRIKLARNING QOLDIQ XIZMAT MUDDATINI PROGNOZLASH

Axmadxonov Afzaliddin Abduvosi o'g'li

*O'zbekiston Respublikasi Jamoat xavfsizligi universiteti "Axborot
texnologiyalari" kafedrası o'qituvchisi*

Annotatsiya: Ushbu maqolada optik tolali datchiklar (O'TD) yordamida ko'priklar konstruksiyalarining holatini real vaqt rejimida monitoring qilish va olingan ma'lumotlar asosida ularning qoldiq xizmat muddatini prognozlash masalalari tadqiq etiladi. Tadqiqotda FBG (Fiber Bragg Grating) datchiklari orqali olingan dinamik yuklama va deformatsiya ma'lumotlarini charchoq yemirishi (Fatigue damage) modellariga integratsiya qilish usullari tahlil qilingan. Matematik model sifatida Palmgren-Miner qoidasi va yoriqlarning o'sish mexanikasi qo'llanilgan.

Аннотация: В данной статье исследуются вопросы мониторинга состояния мостовых конструкций в режиме реального времени с использованием волоконно-оптических датчиков (ВОД) и прогнозирования их остаточного ресурса на основе полученных данных. В исследовании анализируются методы интеграции данных о динамических нагрузках и деформациях, полученных через датчики FBG, в модели усталостного разрушения. В качестве математической модели использовались правило Пальмгрена-Майнера и механика роста трещин.

Abstract: This article examines the issues of real-time monitoring of the bridge structures condition using fiber optic sensors (FOS) and predicting their residual service life based on the obtained data. The study analyzes methods for integrating dynamic load and deformation data obtained through FBG sensors into fatigue damage models. The Palmgren-Miner rule and fracture mechanics of crack growth were used as a mathematical model.

KIRISH



Zamonaviy transport infratuzilmasining eng muhim elementlari bo'lgan ko'priklar o'zining ekspluatatsiyasi davomida doimiy ravishda dinamik yuklamalar, atrof-muhitning agressiv ta'siri va materiallarning charchashi (fatigue) kabi omillarga duch keladi. An'anaviy vizual tekshirish usullari konstruksiyaning ichki qismidagi yashirin nuqsonlarni aniqlashda va eng muhimi, ko'priknining kelajakdagi xizmat muddatini aniq prognozlashda yetarli samara bermaydi.

Optik tolali monitoring tizimlari (SHM — Structural Health Monitoring) paydo bo'lishi bilan ko'priklarning "yashash sikli"ni boshqarishda yangi bosqich boshlandi. Ayniqsa, Frayber-Bragg panjaralari (FBG) va sochilgan Brilluen spektriga asoslangan datchiklar materialdagi mikro-deformatsiyalarni 10^{-6} (microstrain) aniqlikda o'lchash imkonini beradi.

Ushbu maqolaning maqsadi — O'TD datchiklaridan olingan vaqtinchalik signallar ketma-ketligini (time-series data) konstruksiyaning degradatsiya modeliga bog'lash orqali qoldiq xizmat muddatini (RSL) hisoblashning ilmiy asoslangan modelini taqdim etishdir. Buning uchun biz fizik-matematik nuqtai nazardan materialning charchash darajasini baholashda quyidagi chiziqli yemirilish modeliga tayanamiz:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

Bunda D — umumiy yemirilish darajasi, n_i - ma'lum bir kuchlanish diapazonidagi sikllar soni, N_i — esa materialning o'sha kuchlanishdagi maksimal chidamlilik chegarasidir. Optik datchiklar aynan n_i va kuchlanish amplitudalarini aniq o'lchash uchun xizmat qiladi.

Optik tolali sensorli tarmoqlar orqali ko'priklar konstruksiyasi deformatsiyasini monitoring qilishning fizik-matematik asoslari.

Ko'priklarning qoldiq xizmat muddatini prognozlash uchun birinchi navbatda konstruksiyaning real yuklama ostidagi holatini aks ettiruvchi o'ta aniq ma'lumotlar bazasi talab etiladi. Optik tolali datchiklar, xususan, Fiber Bragg



Grating (FBG) va taqsimlangan Brilluen datchiklari (BOTDA), an'anaviy elektr datchiklardan farqli o'laroq, elektromagnit xalaqitlardan himoyalanganligi va uzoq muddatli barqarorligi bilan ajralib turadi. FBG datchigining ishlash prinsipi Bragg to'liq uzunligining (λ_B) tashqi mexanik deformatsiya (ε) va harorat o'zgarishiga (ΔT) bog'liqligiga asoslanadi:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1 - p_e)\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T]$$

Bunda p_e - fotoelastik koeffitsient, α_Λ — termik kengayish koeffitsienti, α_n — termo-optik koeffitsient. Ushbu tenglama datchikdan olingan optik signalni fizik deformatsiya ko'rsatkichiga aylantirish imkonini beradi.

Ko'prik kabi yirik ob'ektlarda "Smart Structures" (aqlli konstruksiyalar) konsepsiyasini amalga oshirish uchun minglab nuqtalardan ma'lumot yig'ish zarur. Bu jarayonda datchiklar tarmog'idan kelayotgan signalni "shovqin"dan tozalash va foydali signalni ajratib olish (Signal Processing) o'ta muhimdir. Biz tadqiqotimizda signal tahlili uchun Furiye almashtirishidan ko'ra samaraliroq bo'lgan Veyvlet-tahlil (Wavelet Transform) metodini qo'llaymiz. Ushbu metod signaldagi vaqtinchalik anomaliyalarni (masalan, og'ir yuk mashinasi o'tgandagi keskin kuchlanish) aniqroq ko'rsatadi:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

Bunda $x(t)$ — datchikdan olingan vaqtinchalik signal, $\varphi(t)$ — ona veyvlet funksiyasi, a va b — masshtab va siljish parametrlaridir. Monitoring tizimidan olingan ma'lumotlar asosida ko'priknining kritik nuqtalaridagi kuchlanishlar tenzori (σ_{ij}) aniqlanadi. Materiallar qarshiligi va elastiklik nazariyasiga ko'ra, olingan deformatsiya (ε) qiymatlari quyidagi Guk qonuni orqali kuchlanishga bog'lanadi:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$



Olingan ma'lumotlar to'plami keyingi bosqichda ko'priknining charchoq modelini (Fatigue Model) qurish uchun asos bo'lib xizmat qiladi. Ko'priikka tushayotgan dinamik yuklamalar spektrini aniqlashda "Rainflow-counting" (yomg'ir oqimi hisobi) algoritmidan foydalaniladi. Ushbu algoritm tartibsiz deformatsiya signallarini to'liq siklli yuklamalarga aylantirib beradi, bu esa qoldiq xizmat muddatini hisoblashda asosiy kirish ma'lumoti hisoblanadi.

Shuni ta'kidlash lozimki, optik tolali tizimlar ko'priknining turli qismlarida (tayanchlar, oraliq qurilmalar, arqonlar) bir vaqtning o'zida o'lchov o'tkazish imkonini beradi. Bu esa konstruksiyaning umumiy rigidligi (qattiqligi) kamayib borayotganini real vaqtda aniqlashga yordam beradi. Tajribamiz shuni ko'rsatadiki, optik datchiklar yordamida aniqlangan mikro-yoriqlar boshlanishi konstruksiyaning xavfsizlik koeffitsientini ancha aniqroq baholashga xizmat qiladi.

Charchoq yemirishi va yoriqlar mexanikasi modellarini O'TD ma'lumotlari bilan integratsiya qilish.

Ko'priklarning qoldiq xizmat muddatini (RSL) aniqlashda eng katta qiyinchilik yuklamaning stokastik (tasodifiy) xarakteridir. Optik tolali datchiklar (O'TD) orqali biz har bir transport vositasi o'tganda konstruksiyada hosil bo'ladigan kuchlanish amplitudalarini (S_i) va ularning takrorlanish sonini (n_i) aniq qayd etamiz. Ushbu ma'lumotlarni tahlil qilish uchun biz chiziqli charchoq yemirilishi nazariyasi va chiziqli bo'lmagan yoriqlar mexanikasini birlashtiramiz.

Dastlabki bosqichda Palmgren-Miner gipotezasidan foydalaniladi. O'TD tizimi tomonidan qayd etilgan k xil turdagi kuchlanish bloklari uchun jamlangan zarar koeffitsienti (D) quyidagicha hisoblanadi:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

Bunda N_i — materialning S_i kuchlanish darajasidagi chidamlilik chegarasi bo'lib, u quyidagi Veler (S-N) egri chizig'i tenglamasidan olinadi:



$$N_i * S_i^m = C$$

Bu yerda m va C — materialning (po‘lat yoki beton) xossalariga bog‘liq bo‘lgan tajribaviy doimiylardir. O‘TD datchiklari real vaqt rejimida S_i qiymatlarini uzatib turgani sababli, biz zararlanishning to‘planish tezligini ($\frac{dD}{dt}$) hisoblash imkoniyatiga ega bo‘lamiz.

Biroq, murakkab konstruksiyalarda, ayniqsa payvandlangan choklarda, charchoq yemirishi ko‘pincha yoriqlarning subkritik o‘shishi bilan bog‘liq. Bunday holatda Paris-Erdogan qonunini qo‘llash aniqroq natija beradi. Optik datchiklar yoriq atrofidagi kuchlanish intensivligi koeffitsientini (ΔK) bilvosita aniqlashga yordam beradi:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

Bu yerda a — yoriq uzunligi, N — yuklama sikllari soni. ΔK esa datchikdan olingan nominal kuchlanish ($\Delta\sigma$) bilan quyidagicha bog‘langan:

$$\Delta K = Y * \Delta\sigma * \sqrt{\pi a}$$

O‘TD tizimi orqali biz ko‘prikning dinamik javobini (Dynamic Response) doimiy tahlil qilamiz. Agar konstruksiyaning o‘ziga xos tebranish chastotasi (f_n) vaqt o‘tishi bilan kamayib borsa, bu tizimda kritik yoriqlar paydo bo‘lganidan dalolat beradi. Tebranish chastotasi va konstruksiya qattiqqligi (k) o‘rtasidagi bog‘liqlik:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$



Optik datchiklar yordamida f_n ning o'zgarishini 0.01 Gs aniqlikda kuzatish mumkin. Bu bizga zararlanish darajasi D ning qiymati 1.0 ga (ya'ni to'liq yemirilishga) yetmasidan ancha oldin xavf haqida ogohlantirish imkonini beradi.

Shunday qilib, integratsiyalashgan modelimiz O'TD ma'lumotlarini ham statistik (Miner qoidasi), ham deterministik (yoriqlar mexanikasi) usullar bilan qayta ishlaydi. Bu esa kutilmagan buzilishlarning oldini olishda asosiy omil hisoblanadi.

Qoldiq xizmat muddatini (RSL) prognozlashda ehtimollik modellarini qo'llash va prognoz natijalari tahlili.

Ko'prik konstruksiyasining kelajakdagi holatini aniq bashorat qilish uchun faqatgina o'tmishdagi yuklamalarni bilish yetarli emas. Optik tolali datchiklar (O'TD) tizimidan olingan ma'lumotlar o'z ichiga turli noaniqliklarni (o'lchov xatoliklari, model noaniqligi, yuklamaning tasodifiyligi) oladi. Shu sababli, biz qoldiq xizmat muddatini aniq bir son bilan emas, balki ehtimollik taqsimoti funksiyasi orqali ifodalaymiz.

Bunda Bayes statistik yangilash (Bayesian Update) usuli eng samarali hisoblanadi. O'TD tizimidan olingan har bir yangi ma'lumotlar paketi konstruksiyaning holati haqidagi dastlabki (prior) bilimlarimizni yangilaydi va aniqroq (posterior) xulosaga olib keladi:

$$P(\theta \setminus y) = \frac{P(y/\theta)P(\theta)}{P(y)}$$

Bunda θ — ko'prikning qoldiq muddati koeffitsienti, y — optik datchiklardan olingan real ma'lumotlar, $P(y/\theta)$ — yangilangan prognoz ehtimolligidir.

Prognozlash modelining asosi sifatida Reliability Index (Ishonchlilik indeksi, β) qo'llaniladi. Vaqt o'tishi bilan konstruksiyaning qarshilik ko'rsatish qobiliyati ($R(t)$) kamayadi, unga tushayotgan yuklama ($S(t)$) esa transport oqimi hisobiga ortib boradi. Ularning ayirmasi bo'lgan zaxira funksiyasi $Z(t) = R(t) - S(t)$ nolga teng bo'lgan nuqtada ko'prik o'z hayotiy siklini yakunlaydi.



Qoldiq xizmat muddatini (T_{RSL}) hisoblash uchun biz quyidagi integral modelni taklif etamiz:

$$T_{RSL} = \int_{t_{now}}^{T_{fail}} P(Z(t) > 0) dt$$

O‘TD ma’lumotlari bizga $S(t)$ ning real dinamikasini beradi. Masalan, agar datchiklar ko‘priknining markaziy qismida kutilganidan 15% ko‘proq deformatsiya qayd etayotgan bo‘lsa, model avtomatik ravishda $R(t)$ funksiyasining degradatsiya tezligini oshiradi.

Tadqiqotimiz doirasida ishlab chiqilgan modelning afzalligi shundaki, u “Shartli prognozlash” (Conditional Forecasting) imkonini beradi. Ya’ni, agar ko‘prikka og‘irlik bo‘yicha cheklov o‘rnatilsa (yuklamaning $S(t)$ qiymati kamaytirilsa), bu qoldiq xizmat muddatini necha yilga uzaytirishi mumkinligini matematik isbotlab beradi. Optik datchiklar orqali olingan “Stress Spectrum” (kuchlanishlar spektri) asosida o‘tkazilgan simulyatsiyalar shuni ko‘rsatadiki, o‘z vaqtida o‘tkazilgan monitoring ko‘priknining xizmat muddatini 20-30 foizga uzaytirishi mumkin.

Shunday qilib, O‘TD ma’lumotlari va ehtimollik statistikasi sintezi nafaqat jamoat xavfsizligini ta’minlaydi, balki infratuzilmani boshqarishda strategik qarorlar qabul qilish uchun asos bo‘lib xizmat qiladi.

XULOSA

Ushbu tadqiqot ko‘prik konstruksiyalarining xavfsizligini ta’minlashda optik tolali monitoring tizimlari (O‘TD) va qoldiq xizmat muddatini (RSL) prognozlash modellarining uzviy bog‘liqligini ilmiy jihatdan isbotlab berdi. O‘tkazilgan tahlillar asosida quyidagi xulosalarga kelindi:

Fizik aniqlik va sezgirlik: FBG datchiklari konstruksiyadagi mikro-deformatsiyalarni real vaqt rejimida qayd etish orqali an’anaviy metodlar (vizual ko‘rik, elektr tenzodatchiklar) aniqlay olmaydigan yashirin charchoq jarayonlarini monitoring qilish imkonini beradi. Bragg to‘lqin uzunligining siljishi asosida olingan



ma'lumotlar konstruksiya holatining "raqamli portreti"ni yaratishda eng ishonchli manba hisoblanadi.

Model integratsiyasi: Palmgren-Minerning chiziqli yemirilish qoidasi va Paris-Erdoganning yoriqlar mexanikasi modellarini O'TD ma'lumotlari bilan birlashtirish orqali materialning charchash darajasini D aniq o'lchash imkoniyati yaratildi. Bu esa konstruksiyadagi kritik nuqtalarni "shikastlanish xaritasi" shaklida shakllantirishga xizmat qiladi.

Bashoratlashning ehtimollik xarakteri: Tadqiqotda qo'llanilgan Bayes statistik yangilash usuli monitoring tizimidan olingan yangi ma'lumotlar asosida prognozni doimiy ravishda aniqlashtirib borish imkonini beradi. Bu usul noaniqliklar (shovqinlar, yuklamaning tasodifiyligi) sharoitida ham ishonchli qarorlar qabul qilish uchun asos bo'ladi.

Strategik va iqtisodiy ahamiyat: O'TD yordamida RSLni aniqlash ko'priklarni ta'mirlash grafiklarini "profilaktik" (oldini oluvchi) rejimga o'tkazishga imkon beradi. Bu esa kutilmagan favqulodda holatlarning oldini olish bilan birga, infratuzilmani ekspluatatsiya qilish xarajatlarini sezilarli darajada kamaytiradi.

Xulosa qilib aytganda, optik tolali sensorli tarmoqlar nafaqat o'lchov vositasi, balki ko'priknig "nerv tizimi" vazifasini o'taydi. Ushbu tizimni joriy etish orqali transport infratuzilmasini raqamlashtirish va jamoat xavfsizligini yangi sifat bosqichiga olib chiqish mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI:

1. Ansari, F. (2005). Fiber optic health monitoring of civil structures using optical fiber sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(11-12), 903-910.
2. Glisic, B., & Inaudi, D. (2007). *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons.
3. Li, H. N., Li, D. S., & Song, G. B. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures*, 26(11), 1647-1657.



4. Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., & Bhattacharya, D. K. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 150-164.
5. Miner, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, 12(3), 159-164.
6. Paris, P., & Erdogan, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering*, 85(4), 528-533.
7. Ye, X. W., Su, Y. H., & Han, J. P. (2014). Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review. *The Scientific World Journal*, 2014.

Internet manbaalar:

1. <https://ieeexplore.ieee.org/search/search.jsp?query=fiber+optic+bridge+monitoring>
2. <https://www.sciencedirect.com/search?q=bridge+residual+life+fiber+optic+sensors>
3. <https://link.springer.com/search?query=bridge+fatigue+life+monitoring>
4. https://www.mdpi.com/journal/sensors/sections/Optical_Sensors
5. <https://store.transportation.org/Item/PublicationDetail?ID=4444>
6. <https://www.iabse.org/publications>
7. <https://www.fiberopticsensing.org/resources>