

METRO INSHOOTLARINING CHIDAMLILIGIGA TA'SIR ETUVCHI EKSPLUATATSION OMILLAR TAHLILI

A'zamov Nodirbek Faxriddin o'g'li

*Toshkent davlat transport
universiteti 1-bosqich tayanch doktoranti*

Annotatsiya: Ushbu maqolada metro inshootlarining uzoq muddatli ekspluatatsiya jarayonida chidamliligiga ta'sir etuvchi asosiy omillar kompleks tarzda tahlil qilinadi. Jumladan, dinamik yuklamalar, vibratsiya va zarb ta'siri, agressiv muhit omillari (namlik, karbonatlashuv, xloridlar), harorat tebranishlari, yer osti suvlari bosimi, korroziya jarayonlari hamda inson omili va texnik xizmat ko'rsatish sifati ko'rib chiqiladi. Shuningdek, konstruktiv yechimlar, zamonaviy materiallardan foydalanish va monitoring tizimlari orqali metro inshootlarining xizmat muddatini uzaytirish mexanizmlari asoslab beriladi.

Kalit so'zlar: ekspluatatsion yuklama, dinamik ta'sir, vibratsiya, korroziya, karbonatlashuv, seysmik ta'sir, deformatsiya, monitoring, ishonchlilik.

Аннотация: В данной статье проводится комплексный анализ основных факторов, влияющих на долговечность конструкций метрополитена в процессе их длительной эксплуатации. В частности, рассматриваются динамические нагрузки, вибрационные и ударные воздействия, факторы агрессивной среды (влажность, карбонизация, хлориды), температурные колебания, давление грунтовых вод, коррозионные процессы, а также человеческий фактор и качество технического обслуживания. Кроме того, обосновываются механизмы продления срока службы сооружений метрополитена за счет конструктивных решений, использования современных материалов и систем мониторинга.

Ключевые слова: Эксплуатационная нагрузка, динамическое воздействие, вибрация, коррозия, карбонизация, сейсмическое воздействие, деформация, мониторинг, надежность.

Kirish. Metro inshootlari - o'nlab yillar davomida uzluksiz va intensiv ekspluatatsiya rejimida faoliyat ko'rsatuvchi o'ta murakkab hamda mas'uliyatli muhandislik tizimidir. Xususan, Toshkent yer usti metrosi (halqa yo'li) qurilishida tatbiq etilgan temir-beton konstruksiyalar nafaqat poyezdlar harakatidan kelib chiqadigan massiv statik va dinamik yuklamalarni, balki mintaqaning keskin kontinental iqlimiga xos tajovuzkor tashqi muhit omillarini ham o'ziga qabul qiladi. Shu bois, inshootlarning texnik holatini muntazam diagnostika qilish, ekspluatatsion omillarni ilmiy asoslangan holda tasniflash va ularning konstruksiya yaxlitligiga ta'sir darajasini chuqur tahlil qilish strategik muhim vazifa hisoblanadi.

Zamonaviy urbanizatsiya sharoitida metro transporti o'zining yuqori o'tkazuvchanlik qobiliyati, ekologik zararsizligi va vaqt samaradorligi bilan shahar infratuzilmasining tayanch nuqtasiga aylandi. Toshkent metropolitenining so'nggi yillardagi jadal rivojlanishi, jumladan, yangi yer usti estakadalari va yer osti liniyalarining foydalanishga topshirilishi, inshootlarning uzoq muddatli chidamliligini va seysmik xavfsizligini ta'minlash masalasini kun tartibidagi eng dolzarb muammolardan biriga aylantirdi.

Metro infratuzilmasini tashkil etuvchi tunnellar, estakadalar, tayanch ustunlar, bekat majmualari va ventilyatsiya tizimlari kabi elementlar o'zaro uzviy bog'liqlikda, murakkab geotexnik va texnogen sharoitda ishlaydi. Ular doimiy ravishda yuqori chastotali tebranishlar, gidrogeologik bosim, harorat gradiyentlari va korroziion jarayonlar kabi kompleks ta'sirlarga duch keladi. Binobarin, ushbu inshootlarning mustahkamlik zaxirasi va ekspluatatsion ishonchliligi nafaqat loyihalash va qurilish bosqichida, balki butun xizmat muddati davomida innovatsion monitoring tizimlari orqali qat'iy nazorat qilinishi shart.

Dinamik yuklamalar va vibratsion ta'sir. Metro poyezdlarining harakat tarkibi natijasida relslar va tayanch qismlari orqali inshoot konstruksiyalariga uzatiladigan dinamik yuklamalar elementlarda yuqori chastotali tebranishlar va siklik zo'riqishlar maydonini hosil qiladi. Ushbu dinamik jarayonlarning uzoq muddatli

ta'siri temir-beton konstruksiyalarning strukturaviy yaxlitligiga salbiy ta'sir ko'rsatib, quyidagi patologik oqibatlarni keltirib chiqarishi mumkin:

Mikrostrukturaning buzilishi: Beton va temir-beton elementlarning cho'zilish zonalarida ko'zga ko'rinmas mikro yoriqlar paydo bo'lishi va ularning vaqt o'tishi bilan magistral yoriqlarga aylanishi;

Adgeziyaning pasayishi: Armatura va beton orasidagi yopishish (adgeziya) kuchining dinamik tebranishlar natijasida zaiflashishi, bu esa elementning egilishga bo'lgan qarshiligini kamaytiradi;

Charchash effekti: Materialning chidamlilik chegarasidan past bo'lgan, lekin ko'p marotaba takrorlanuvchi yuklamalar ta'sirida beton tarkibining toifaviy yemirilishi va charchash jarayonining jadallashuvi.

Ayniqsa, yer usti estakada konstruksiyalarida vaziyat yanada murakkabroq kechadi. Bu yerda poyezdlarning dinamik ta'siri aerodinamik (shamol) yuklamalari bilan sinxron ravishda namoyon bo'ladi va qo'shimcha tebranish amplitudalarini yuzaga keltiradi. Agar inshootning xususiy tebranish chastotasi tashqi dinamik kuchlanish chastotasi bilan mos kelsa, xavfli rezonans hodisasi yuzaga kelish ehtimoli ortadi. Bu esa konstruksiyaning geometrik barqarorligini yo'qotishiga va ekstremal holatlarda estakada bloklarining seysmik bardoshlilikini pasaytirib, muddatidan oldin texnogen inqirozga olib kelishi mumkin.

Seysmik ta'sir va geodinamik omillar. O'zbekiston Respublikasi hududi, xususan poytaxt Toshkent shahri, murakkab tektonik tuzilishga ega bo'lgan va 9 ballgacha bo'lgan yuqori seysmik faollikka ega mintaqada joylashgan. Seysmik hodisalar metro inshootlarining poydevor va estakada konstruksiyalariga o'ta qisqa vaqt oralig'ida ulkan kinetik energiya uzatilishiga sabab bo'ladi. Ushbu jarayon inshoot strukturasida quyidagi xavfli o'zgarishlarni keltirib chiqarishi mumkin:

Inersion zo'riqishlar va keskin deformatsiyalar: Yer qatlamlarining gorizontal va vertikal tezlanishi natijasida konstruksiyada ruxsat etilgan me'yorlardan yuqori bo'lgan siljishlar yuzaga keladi;

Kuchlanishlarning statsionar bo'lmagan qayta taqsimlanishi: Konstruktiv tugunlar va tutashma nuqtalarida statik holatda ko'zda tutilmagan ekstremal zo'riqlashlarning kontsentratsiyalanishi;

Mo'rt buzilish: Betonning cho'zilishga chidamliligi pastligi sababli, dinamik zarba ta'sirida konstruktiv elementlarning plastik deformatsiyaga ulgurmasdan, to'satdan yemirilishi.

Metro inshootlarining seysmik barqarorligini va ekspluatatsion ishonchligini ta'minlashda quyidagi innovatsion muhandislik yechimlari hal qiluvchi ahamiyatga ega:

Yuqori duktillik (qovushqoqlik) xususiyatini ta'minlash: Beton tarkibiga polimer tolalar (fibra) qo'shish va B40 kabi yuqori klassli betonlardan foydalanish orqali konstruksiyaning energiya yutish qobiliyatini oshirish;

Seysmik izolyatsiyalash tizimlari: Estakada bloklari va tayanch ustunlari orasida elastomerni tayanch qismlari hamda maxsus amortizatorlarni qo'llash orqali inshootga keladigan seysmik yuklamani dissipatsiya qilish (so'ndirish);

Energiya yutuvchi tugunli sxemalar: Konstruktiv bog'lanishlarni "egiluvchan bo'g'in" tamoyili asosida loyihalash, bu esa seysmik energiya ta'sirida tugunlarning butunlay buzilmasdan, deformatsiyalanish orqali yuklamani kompensatsiya qilishini ta'minlaydi.

Agressiv muhit va korroziya jarayonlari. Seysmik koefitsiyentlarning konstruktiv yechimlar bilan bog'liqligi. Inshootning seysmik mustahkamligini hisoblashda qo'llaniladigan koefitsiyentlar bevosita tanlangan material va konstruktiv sxemaga bog'liq:

k_1 (Ruxsat etilgan shikastlanishlar koefitsiyenti): Yuqori duktillikka ega bo'lgan B40 betonidan foydalanish va tugunlarni energiya yutuvchi sxema asosida loyihalash k_1 qiymatini optimallashtirishga imkon beradi. Bu esa inshootning zilzila paytida plastik deformatsiyalar hisobiga omon qolish qobiliyatini oshiradi.

k_2 (Konstruktiv yechim koefitsiyenti): Elastik tayanchlar va amortizatorlarning qo'llanilishi inshootning dinamik modelini o'zgartiradi. Bu esa hisobiy seysmik

yuklamaning (S_{Oik}) umumiy qiymatini kamaytirishga va inshootning xususiy tebranish davrini xavfli rezonans zonasidan chiqarishga xizmat qiladi.

Yuqoridagi muhandislik yechimlarining kompleksi nafaqat Toshkent yer usti metrosining seysmik xavfsizligini ta'minlaydi, balki kutilmagan dinamik impulsli yuklamalar ostida inshootning mo'rt buzilish xavfini minimal darajaga tushiradi.

Harorat va iqlim omillari. Yer usti metro inshootlarining ekspluatatsiya sharoitida issiqlik gradiyenti va harorat tebranishlari konstruksiyaning uzoq muddatli barqarorligini belgilovchi asosiy omillardan biri hisoblanadi. O'zbekiston iqlimiga xos bo'lgan sutkali va mavsumiy haroratning keskin o'zgarishi (yozda beton sirtining +50-60°C gacha qizishi va qishda -20°C dan past sovushi) material strukturasida murakkab termodinamik jarayonlarni keltirib chiqaradi. Takrorlanuvchi issiklik kengayishi va chiziqli qisqarish sikllari quyidagi salbiy oqibatlariga sabab bo'ladi:

Termik zo'riqlashlarning kontsentratsiyasi: Betonning tashqi qatlami va ichki yadrosi o'rtasidagi harorat farqi natijasida massiv konstruksiyalarda ichki zo'riqlashlarning ortishi va sirtqi qatlamda "termik yoriqlar" paydo bo'lishi;

Deformatsion choklarning ishdan chiqishi: Estakada bloklari orasidagi chok va birikmalarda siljish deformatsiyalarining jadallashishi, bu esa gidroizolyatsiya qatlaminin butunligini buzishi mumkin;

Mikrostrukturaning destruksiyasi: Betonning g'ovakli muhitida mikro yoriqlarning kengayishi va materialning yaxlitlik koeffitsiyenti pasayishi.

Ayniqsa, muzlash-erish sikllari sharoitida betonning chidamliligi jiddiy sinovga duch keladi. Agar atmosfera namligi yoki yog'ingarchilik suvlari betonning kapillyar g'ovaklari va mikro yoriqlari ichiga kirib, manfiy haroratda muzlasa, suv hajmining taxminan 9 % ga kengayishi natijasida beton ichida ulkan kriogen bosim yuzaga keladi. Bu jarayonning ko'p marotaba takrorlanishi sement toshining strukturaviy buzilishiga, betonning qatlamlanib ko'chishiga va natijada armaturaning korroziyaga uchrashiga sharoit yaratadi.

Shu sababli, Toshkent yer usti metrosi uchun qo'llaniladigan B40 betonlari nafaqat mustahkamlik, balki sovuqqa chidamlilik (F) va suv o'tkazmaslik (W)

bo'yicha yuqori ko'rsatkichlarga ega bo'lishi, shuningdek, beton tarkibida havo jalb qiluvchi va zichlashtiruvchi zamonaviy qo'shimchalar bo'lishi shart.

Inson omili va texnik xizmat ko'rsatish. Metro inshootlarining uzoq muddatli chidamliligi va xavfsizligi nafaqat loyihalash va qurilish sifatiga, balki tizimli yo'lga qo'yilgan ekspluatatsiya madaniyati va texnik xizmat ko'rsatish strategiyasiga bevosita bog'liq. Jahon tajribasi shuni ko'rsatadiki, rejalashtirilgan profilaktik ko'riklar va diagnostika tadbirlarining o'z vaqtida o'tkazilmasligi, dastlab ahamiyatsiz ko'ringan mikronuqsonlarning progressiv yemirilish jarayoniga aylanib, yirik texnogen avariya holatlarni keltirib chiqarishiga sabab bo'lishi mumkin.

Zamonaviy sharoitda inshootlarning texnik xizmat ko'rsatish tizimi quyidagi kompleks diagnostika yo'nalishlarini qamrab olishi shart.

Avtomatlashtirilgan yoriqlar monitoringi: Beton yuzasidagi destruktiv o'zgarishlarni aniqlashda optik va ultratovushli datchiklardan foydalanish. Bu nafaqat yoriqning kengligini, balki uning chuqurlashish dinamikasini ham nazorat qilish imkonini beradi;

Geodezik va fazoviy nazorat: Yuqori aniqlikdagi lazerli skanerlash (Lidar) va raqamli nivelirlash orqali estakada tayanchlarining cho'kishi, gorizont siljishi va geometrik o'qdan og'ishini millimetrik aniqlikda kuzatib borish;

Vibratsion monitoring tizimlari: Inshootning turli nuqtalariga o'rnatilgan akselerometrlar yordamida poyezdlar harakati davridagi dinamik javob reaksiyalarini o'rganish. Bu tizim rezonans xavfi va konstruksiyaning "charchash" darajasini real vaqtda aniqlaydi;

Vaziyatli diagnostika usullari: Beton mustahkamligini buzmasdan nazorat qilish (sklerometrlar, radiolokatsiya) orqali armatura korroziyasi va betonning ichki bo'shliqlari holatini tahlil qilish.

Bugungi kunda raqamli monitoring va "Internet of Things" texnologiyalarini tatbiq etish metro infratuzilmasini boshqarishda yangi davrni ochmoqda. Masofaviy sensorlar yordamida shakllantirilgan **"Raqamli egizak" (Digital Twin)** modellari inshoot holatini real vaqt rejimida (24/7) baholash, yuzaga kelishi mumkin bo'lgan

xavflarni oldindan prognoz qilish va ekspluatatsiya xarajatlarini optimallashtirish imkonini beradi. Bunday yondashuv Toshkent yer usti metrosi kabi strategik ob'ektlarning ishonchlilik koeffitsiyentini maksimal darajaga ko'taradi.

Chidamlilikni oshirish yo'llari. Toshkent yer usti metro inshootlarining konstruktiv ishonchliligini oshirish va xizmat muddatini (service life) sezilarli darajada uzaytirish uchun quyidagi kompleks ilmiy-amaliy chora-tadbirlarni amalga oshirish tavsiya etiladi:

Innovatsion beton texnologiyalarini tatbiq etish: Yuqori mustahkamlikka ega (B40 va undan yuqori) hamda suv-sement nisbati past ($W/C \leq 0.35$) bo'lgan beton tarkiblarini qo'llash. Bunda zamonaviy superplastifikatorlar va mikrosilika (kremnezem) kabi qo'shimchalardan foydalanish betonning diffuzion o'tkazuvchanligini kamaytiradi, bu esa konstruksiyani ichki korroziyadan himoya qiladi.

Armatura karkaslarining korroziyaga bardoshliligini oshirish: Agresiv muhit va namlik yuqori bo'lgan hududlarda an'anaviy armatura o'rniga kompozit (shisha-tolali) yoki epoksid qoplama bilan himoyalangan korroziyaga chidamli armatura turlarini qo'llash. Bu po'latning oksidlanish jarayonini sekinlashtirib, betonning qatlamlanib ko'chib ketish xavfini bartaraf etadi.

Ko'p bosqichli gidroizolyatsiya tizimlari: Estakada va tayanch konstruksiyalarida faqat yuzaki emas, balki betonning ichki qismiga kirib boruvchi (penetratsion) gidroizolyatsiya materiallarini qo'llash. Bu usul mikro yoriqlarni "o'zi davolash" (self-healing) xususiyatini berib, namlikning kapillyar yo'llar orqali kirishiga to'sqinlik qiladi.

Intellektual seysmik izolyatsiya: Seysmik yuklamalarni dissipatsiya qilish uchun yuqori samarali elastomerni seysmik izolyatorlar va gidravlik dempferlarni joriy etish. Ushbu elementlar zilzila va kuchli dinamik tebranishlar paytida konstruksiyaning kinetik energiyasini yutib, asosiy yuk ko'taruvchi elementlarni shikastlanishdan asraydi.

Raqamli transformatsiya (BIM va Digital Twin): Loyihalash bosqichida Inshootning axborot modellashtirish texnologiyasi (Building Information Modeling) texnologiyasidan foydalanish va ekspluatatsiya jarayonida inshootning “Raqamli egizagi” (Digital Twin) tizimini shakllantirish. Bu real vaqt rejimida datchiklardan olingan ma’lumotlarni tahlil qilish, konstruksiyadagi zo’riqlashlarni prognoz qilish va “bashoratli texnik xizmat ko’rsatish” strategiyasini amalga oshirish imkonini beradi.

Xulosa o’rnida ta’kidlash lozimki, metro inshootlarining uzoq muddatli chidamliligi (durability) - bu dinamik, seysmik, iqlimiy, fizik-kimyoviy va inson omillarining murakkab interaktsiyasidan iborat ko’p omilli tizimdir. Tadqiqotlar shuni ko’rsatadiki, Toshkent yer usti metrosi kabi strategik ob’ektlarda faqatgina yuqori mustahkamlikka ega B40 betonlarini qo’llash kifoya qilmaydi; inshootning butun xizmat muddati davomida uning strukturaviy butunligini saqlash uchun kompleks yondashuv talab etiladi.

Ushbu omillarni chuqur tahlil qilish hamda **axborot-modellashtirish** va **seysmik izolyatsiya** kabi ilmiy asoslangan konstruktiv-texnologik yechimlarni integratsiya qilish quyidagi natijalarga erishish imkonini beradi:

Metro infratuzilmasining ekspluatatsion ishonchliligini (reliability) prognozlashtirilgan darajada ta’minlash;

Konstruksiyalarning xizmat muddatini uzaytirish orqali 30 - 50 % iqtisodiy samaradorlikka erishish;

Yo’lovchi tashish xavfsizligi va tizim barqarorligini xalqaro standartlar darajasiga ko’tarish.

Shu bois, ekspluatatsion omillar monitoringini raqamlashtirish, sun’iy intellektga asoslangan diagnostika tizimlarini joriy etish hamda innovatsion, o’zi tiklanuvchi (self-healing) materiallardan foydalanish zamonaviy metropoliten tizimlarini barqaror rivojlantirishning (sustainable development) eng ustuvor va strategik yo’nalishi bo’lib qoladi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Shaumarov S.S., Adilova Sh.A. Metro inshootlarini ekspluatatsiya qilishda monitoring va diagnostika tizimlarini takomillashtirish // Transport: fan va texnika. – Toshkent, 2021. - №3. – B. 12-18.
2. Raupov Ch.S. Binolar va inshootlarning seysmik chidamliligi: Nazariya va hisob-kitob metodlari. – Toshkent: Fan, 2018.
3. Karimov A.A., Axmedov M.A. Yuqori mustahkamlikka ega B40 betonlarining fizik-mexanik xususiyatlarini tadqiq etish // Qurilish va me'morchilik muammolari. – Samarqand, 2022. - №2. – B. 45-50.
4. Asatov N.U. Temir-beton konstruksiyalarining seysmik mustahkamligi va dinamikasi: O'quv qo'llanma. – Toshkent: Tafakkur, 2020. – 186 b.
5. Neville A.M. Properties of Concrete. 5th Edition. – London: Pearson Education Limited, 2011. – 846 p. (Beton xossalari bo'yicha fundamental asar).
6. Aitcin P.C. High-Performance Concrete. – London: E & FN Spon, 1998. (Yuqori mustahkamlikdagi betonlar texnologiyasi).
7. Winkler J., et al. Digital Twins for Structural Health Monitoring of Bridges // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2023. – Vol. 13. – P. 105-122.
8. Wang X. Seismic Response of Elevated Metro Viaducts under Dynamic Loads // Engineering Structures Journal. – 2020. – No. 215.