

Prediktivno održavanje tramvajskih kolosijeka na čvrstoj podlozi primjenom tehnologije digitalnog blizanca

Franka Meštrović¹, izv. prof. dr. sc. **Ivo Haladin²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, fmestrovic@grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ihaladin@grad.hr

Sažetak

primjenu naprednih metoda upravljanja infrastrukturom, osobito u kontekstu tramvajskih kolosijeka koji su kontinuirano izloženi složenim dinamičkim opterećenjima. Unatoč prednostima kolosijeka na čvrstoj podlozi, poput stabilnosti, dugotrajnosti i smanjenih troškova održavanja, ovi sustavi su podložni degradaciji zbog cikličkih opterećenja i vibracija, što može negativno utjecati na sigurnost i ekonomsku održivost. U tom kontekstu, prediktivno održavanje temeljeno na tehnologiji digitalnog blizanca ističe se kao jedno od mogućih rješenja. Digitalni blizanac predstavlja virtualni model fizičkog sustava koji se u stvarnom vremenu ažurira operativnim podacima prikupljenim pomoću senzora, čime se omogućuje pravovremeno prepoznavanje anomalija, simulacija procesa degradacije i optimizacija aktivnosti održavanja.

Ključne riječi: digitalni blizanac, tramvajski kolosijek, čvrsta podloga, prediktivno održavanje, dinamički utjecaji

Predictive maintenance of slab tram tracks using digital twin technology

Abstract

The development of sustainable urban transport systems requires the implementation of advanced infrastructure management methods, particularly in the context of tram tracks that are continuously exposed to complex dynamic loads. Despite the advantages of tracks on solid foundations, such as stability, durability, and reduced maintenance costs, these systems remain susceptible to degradation caused by cyclic loads and vibrations, which can negatively impact safety and economic sustainability. In this context, predictive maintenance based on digital twin technology emerges as a potential solution. A digital twin represents a virtual model of a physical system that is updated in real time with operational data collected via sensors, enabling timely anomaly detection, simulation of degradation processes, and optimization of maintenance activities.

Key words: digital twin, tram track, slab track, predictive maintenance, dynamic effects

1 Uvod

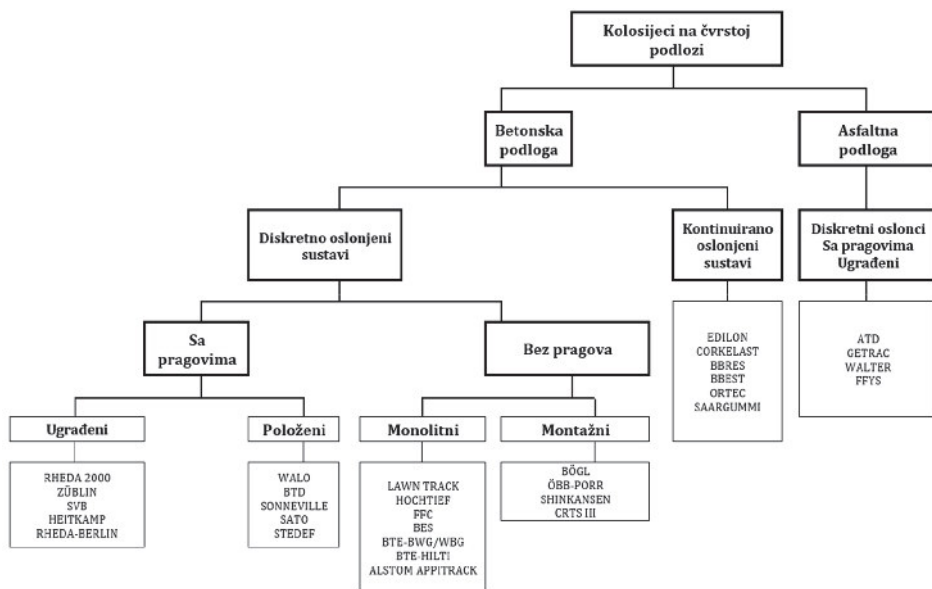
Intenzivna urbanizacija i porast zahtjeva za javnim gradskim prijevozom stavljaju sve veći naglasak na pouzdanost i učinkovitost prometne infrastrukture. Tramvajski kolosijeci, osobito oni izvedeni na čvrstoj podlozi, sve se češće primjenjuju u suvremenim prometnim sustavima zbog svojih prednosti u pogledu stabilnosti, dugotrajnosti i smanjene potrebe za održavanjem. Međutim, unatoč navedenim prednostima, kolosijeci na čvrstoj podlozi izloženi su složenim dinamičkim utjecajima koji uključuju ciklička opterećenja, vibracije i promjene u interakciji kotača i tračnica. Navedeni utjecaji mogu dovesti do degradacije kolosiječne konstrukcije, smanjenja udobnosti vožnje te povećanja troškova održavanja, osobito ukoliko se nedostaci ne uoče na vrijeme. U skladu s time, suvremeni pristupi održavanju željezničke infrastrukture sve se više oslanjaju na napredne digitalne tehnologije. Jedan od perspektivnih pristupa je digitalni blizanac (engl. *digital twin*), tehnologija koja predstavlja virtualni model stvarnoga sustava, čije je ponašanje moguće pratiti u realnom vremenu. Integracijom podataka prikupljenih uređajima i senzorima, numeričkim modeliranjem konstrukcije te primjenom umjetne inteligencije, digitalni blizanac može pratiti ponašanje kolosijeka, analizirati dinamičke utjecaje i predviđati buduće nedostatke konstrukcije. Cilj ovog rada je analizirati dosegnutu razinu istraživanja u području primjene tehnologije digitalnih blizanaca u svrhu praćenja stanja kolosiječnih konstrukcija na čvrstoj podlozi i sustava prediktivnog održavanja.

2 Tramvajski kolosijek na čvrstoj podlozi

Iako se većina željezničkih pruga još uvijek temelji na klasičnim kolosijecima sa zastornom prizmom, sve veća ograničenja takvih sustava u pogledu prometnog kapaciteta, potrebe za održavanjem i ostvarivanjem većih brzina ukazali su na potrebu za alternativnim rješenjima [1]. Posljednjih desetljeća intenzivno se razvijaju kolosijeci na čvrstoj podlozi, pri čemu se zastorna prizma zamjenjuje stabilnijim materijalima poput betona ili asfalta (Slika 1) [2]. Takva rješenja sve se više primjenjuju zbog svojih tehničkih i eksploatacijskih prednosti, poput produženog životnog vijeka i otpornosti na vanjske utjecaje, što izravno smanjuje troškove održavanja i potrebu za intervencijama. Primjena čvrste podloge omogućuje očuvanje geometrijske točnosti kolosijeka, visoku stabilnost konstrukcije te smanjenje deformacija izazvanih dinamičkim opterećenjima i temperaturnim promjenama. Smanjena konstruktivna visina i ukupna masa sustava omogućuju njegovu prilagodbu u ograničenim uvjetima, što ga čini pogodnim za primjenu u urbanim sredinama i na objektima. Također, tehnologija izvedbe s modularnim elementima omogućuje bržu izgradnju i optimizaciju troškova [2, 3].

Tramvajski sustavi predstavljaju važnu sastavnicu funkcionalnih i učinkovitih gradskih prometnih mreža zahvaljujući visokoj frekvenciji prometa, prilagodljivo-
sti urbanim uvjetima i utjecaju na smanjenje prometnih gužvi. Budući da tramvaji
prometuju kroz prostorno ograničene koridore gusto naseljenih gradskih središta
te često dijele prometnu površinu s cestovnim vozilima, nužna su rješenja koja
omogućuju visoku učinkovitost u takvim uvjetima. Obzirom na navedeno, kolosi-
jeci na čvrstoj podlozi predstavljaju povoljno rješenje za modernizaciju tramvaj-
skih sustava i njihov daljnji razvoj, osiguravajući stabilnost te točnost geometrije
kolosijeka i pri visokim ponavljajućim opterećenjima, manjim brzinama i krivina-
ma manjih polumjera.

Također, smanjena je potreba za čestim održavanjem, što je ključno za minimali-
zaciju zastoja u prometno opterećenim područjima [4].



Slika 1. Podjela kolosijeka na čvrstoj podlozi [1,2]

Dinamički utjecaji na željeznički kolosijek prvenstveno proizlaze iz prometnog op-
teretjenja, gdje kombinacija statičkih i dinamičkih sila uzrokuje složene interakcije
s kolosiječnom konstrukcijom i temeljnim tlom. Drugi značajan aspekt je interak-
cija između kotača i tračnice. Neravnine na voznoj površini tračnica i geometrija
glave tračnice, oblik kotača i ispusta vijenca kotača, konusni oblik tramvajskih ko-
tača te geometrijska odstupanja kolosijeka po visini i smjeru, uključujući varijacije
u osnom razmaku ležajeva, mogu uzrokovati pojavu dinamičkih udara i vibracija
većih od dopuštenih vrijednosti [5].

Unatoč brojnim prednostima, kolosijeci na čvrstoj podlozi suočavaju se s određenim ograničenjima. Oštećenja elemenata konstrukcije uslijed složenih dinamičkih utjecaja, nedostatna automatizacija procesa izgradnje te složenost i trošak održavanja predstavljaju ključne izazove. Dinamički utjecaji mogu uzrokovati mehaničke degradacije: oštećenja nosive betonske podloge i sustava pričvršćenja uslijed zamora, pojavu pukotina na mjestu prijelaza između različitih kolosiječnih sustava, ubrzano trošenje tračnica i kotača te gubitak elastičnih svojstava pojedinih elemenata kolosiječne konstrukcije [5]. Uslijed oštećenja, te povećane krutosti sustava zbog zamjene zastorne prizme sa čvrstom podlogom, povećan je prijenos vibracija i buke prema okolini [6]. Nadalje, izazov predstavlja osjetljivost kolosijeka na slijeganja tla, budući da prekoračenje graničnih vrijednosti tijekom uporabnog vijeka može dovesti do narušavanja geometrije kolosijeka te zahtijevati složene intervencije [7]. Također, prisutna fragmentacija tržišta, uzrokovana velikim brojem različitih tipova konstrukcija (Slika 1), dodatno pridonosi složenosti aktivnosti izvedbe i održavanja [2,8].

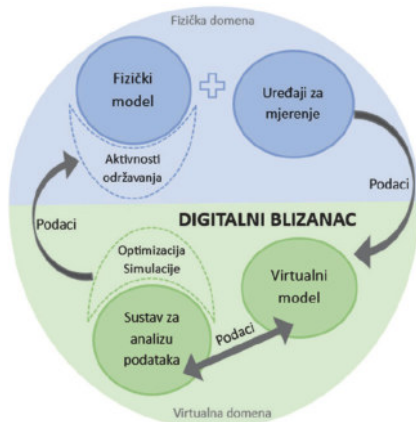
Upravo u kontekstu navedenih izazova, primjena tehnologije digitalnog blizanca pokazuje veliki potencijal. Implementacijom digitalnog blizanca moguće je u stvarnom vremenu pratiti stanje kolosiječne konstrukcije, analizirati opterećenja i utjecaje iz okoline te optimizirati raspored i aktivnosti održavanja na temelju stvarnih podataka. Time se povećava učinkovitost upravljanja infrastrukturom i dugoročno se smanjuju operativni troškovi uz povećanje razine sigurnost sustava [9].

3 Prediktivno održavanje željezničkih kolosijeka primjenom digitalnog blizanca

Digitalni blizanac je izvor podataka u obliku virtualnog modela fizičkog sustava koji omogućuje optimizaciju elemenata u fazi projektiranja, praćenje i analizu stanja (elemenata) sustava tijekom perioda eksploatacije te provođenje simulacija scenarija [10]. Korištenje digitalnih blizanaca u kombinaciji s drugim informacijskim i komunikacijskim tehnologijama, osobito umjetnom inteligencijom, 5G mrežom te strojnim i dubinskim učenjem, može unaprijediti upravljanje sustavima i omogućiti pravovremeno planiranje aktivnosti održavanja sustava [11].

Tehnologija digitalnog blizanca može se promatrati u fizičkoj i digitalnoj domeni (Slika 2), dok su komponente unutar i između domena povezane, čime je osigurana funkcionalnost digitalnog blizanca [12]. Fizičku domenu čini stvarna konstrukcija za koju se izrađuje digitalni blizanac te skup mjernih uređaja i senzora kojima se diskretno ili kontinuirano mjere fizikalne veličine od značaja za pojedinu analizu. U virtualnoj domeni izrađuje se numerički model koji služi za provođenje statičke i dinamičke analize, analitička ispitivanja te optimizaciju i parametriza-

ciju pojedinih geometrijskih ili karakteristika materijala. Vrijednosti zabilježene u fizičkoj domeni obrađuju se putem sustava za analizu podataka u virtualnoj domeni. Pomoću podataka prikupljenih kontinuiranim praćenjem stanja i diskretnim mjerenjima te korištenjem naprednih algoritama za obradu podataka, moguće je procijeniti trenutno i buduće stanje konstrukcije, detektirati anomalije te predvidjeti potencijalna oštećenja, čime se osigurava pravovremeno donošenje odluka i optimizacija aktivnosti održavanja [12].

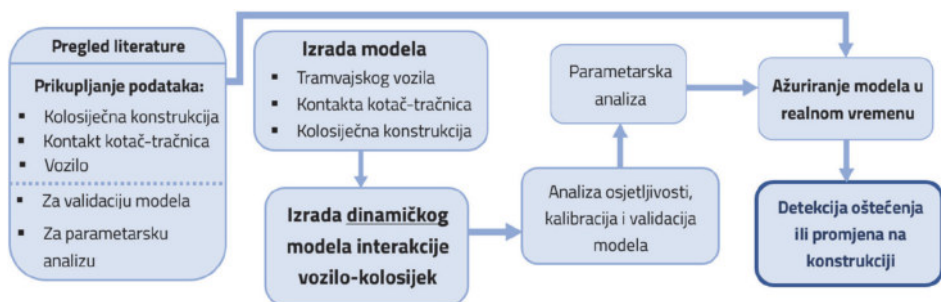


Slika 2. Fizička i virtualna domena koje čine izvor informacija – digitalni blizanac

S obzirom na složenost željezničkih sustava, možemo ih podijeliti na infrastrukturni i funkcionalni podsustav, sa daljnjom podjelom infrastrukturnog sustava na građevinski, elektroenergetski, prometno-upravljački i signalno-sigurnosni podsustav na kolosijeku i vozilu. Tijekom posljednjih godina napravljeni su značajni iskoraci u primjeni tehnologije digitalnog blizanca na razini navedenih podsustava, te se iz tog razloga istraživanje za ovaj rad fokusiralo na primjenu u građevinskom podsustavu. Tako je istražena primjena digitalnog blizanca na razvoj kolosiječnih konstrukcija [13-16], dok se najveći dio preostalih studija odnosi na razvoj digitalnih blizanca za praćenje stanja građevinskih konstrukcija [17-19], kao što su mostovi i tuneli.

Tema ovog istraživanja odvija se u sklopu projekta URITMIS [20] kojem je u cilju uspostaviti sustav za prediktivno održavanje tramvajske infrastrukture, pri čemu se temeljna metodologija oslanja na analizu vibro-akustičkih signala prikupljenih putem senzora integriranih na okviru voznog postolja tramvaja koji sudjeluje u redovitom prometu [21]. Praćenje stanja kolosijeka pomoću mjernih željezničkih vozila predstavlja značajnu aktivnost suvremenih strategija održavanja, uz sve češću primjenu vozila koja sudjeluju u redovitom prometu [22,23]. Osim prikupljanja podataka u operativnim uvjetima, provode se i diskretne mjerne kampanje.

Ova dva komplementarna pristupa omogućuju cjelovitu procjenu stanja kolosije-ka: operativna mjerenja pružaju podatke o ponašanju pruge tijekom eksploataci-je, dok diskretna mjerenja omogućuju lokalizirano praćenje stanja kolosiječne konstrukcije [24]. U aktualnoj fazi istraživanja, naglasak je na eksperimentalnoj validaciji razvijene metodologije. Dinamičko ponašanje vozila ispituje se anali-zom transfer funkcija između kotača i okvira voznog postolja, čime se omogućuje identifikacija i kvantifikacija geometrijskih nepravilnosti tračnica na temelju sig-nala ubrzanja prikupljenih tijekom eksploatacije. Algoritmi za detekciju nedosta-taka razvijaju se primjenom naprednih metoda obrade signala i tehnika strojnog učenja, s naglaskom na automatiziranu procjenu kvalitete zavarenih spojeva i identifikaciju lokaliziranih oštećenja [20]. U skladu sa dosegnutom razinom is-traživanja na projektu, sljedeća faza uključuje razvoj numeričkog modela radi detaljne analize utjecaja pojedinih parametara i vanjskih dinamičkih utjecaja na ukupni dinamički odaziv sustava (Slika 3).



Slika 3. Tijek razvoja numeričkog modela tramvajske kolosiječne konstrukcije

Podaci se prikupljaju kontinuirano u fizičkoj domeni te se u stvarnom vremenu prenose u virtualnu, gdje se koriste za kalibraciju i validaciju dinamičkog modela interakcije vozilo–kolosijek. Tako prikupljeni podaci omogućuju detaljnu analizu utjecaja pojedinih parametara na dinamički odaziv konstrukcije te služe kao temelj za sustavno praćenje stanja infrastrukture u realnim eksploatacijskim uvje-tima.

Naime, zabilježeni podaci obrađuju se i analiziraju kako bi se kroz razvoj mode-la degradacije konstrukcije tijekom vremena, uz primjenu umjetne inteligencije i naprednih algoritama strojnog učenja, identificirali obrasci ponašanja te pred-vidjeli vremenski okviri mogućih oštećenja. Na temelju tih predikcija donose se konkretne operativne odluke o načinu, mjestu i vremenu intervencije, uz procjenu očekivanih tehničkih i ekonomskih učinaka izostanka održavanja [24].

Za napredak u području istraživanja prediktivnog održavanja, tijekom posljednjih par godina intenzivno se istražuje primjena digitalnog blizanca [25–27], obzirom da navedena tehnologija koristi podatke, kontinuirano i diskretno prikupljene

uređajima u stvarnom vremenu, kako bi se oštećenja predvidjela prije pojave te omogućilo proaktivno planiranje popravaka ili zamjene dotrajalih komponenti [28]. Napredak je ostvaren prvenstveno zahvaljujući primjeni naprednih tehnologija poput interneta stvari (engl. *Internet of Things, IoT*), umjetne inteligencije, dostupnosti velikih skupova podataka i povećanoj računalnoj snazi [11, 29].

Usprkos nizu navedenih prednosti, implementacija tehnologije digitalnog blizanca za prediktivno održavanje željezničkih kolosijeka suočava se s nizom izazova koji znatno usporavaju njezinu širu primjenu. Visoki inicijalni troškovi, vezani uz nabavu opreme i mjernih uređaja te uspostava infrastrukture za kontinuirano prikupljanje i obradu podataka, predstavljaju značajan izazov. Nadalje, podaci prikupljeni praćenjem željezničke infrastrukture imaju velik prostorno-vremenski obuhvat zbog linijskog karaktera željeznice i kontinuiranog prikupljanja podataka u stvarnom vremenu, provode se različitim metodama i uređajima, neujednačeni su (pretežno podaci o "standardnom" stanju naspram odstupanja/oštećenja) te sadrže izraženu razinu šuma prisutnog u rezultatima uzrokovanu raznolikim uvjetima okoline duž trase (teren, klima i performanse senzora) [24]. Održavanje digitalnog blizanca zahtijeva kontinuirano ažuriranje softvera, usklađivanje s promjenama u stvarnom sustavu i održavanje točnosti modela, što podrazumijeva potrebu za stalnim razvojem tehničkih znanja i vještina [11]. Mnogi algoritmi koji se koriste za obradu podataka i donošenje odluka zahtijevaju velike količine podataka za pouzdane rezultate kako bi se dosegla potrebna razina pouzdanosti, što je problematično obzirom da se rijetko dostigne slom (elementa) konstrukcije. Nadalje, modeli temeljeni na fizičkim zakonitostima izrazito su složeni, što ih čini vrlo zahtjevnima u pogledu resursa i stručnosti potrebne za njihovu izradu. Takvi modeli često imaju ograničenu mogućnost generalizacije jer su uglavnom prilagođeni za specifične konstrukcije. Također, integracija velikog broja uređaja i izvora podataka zahtijeva robusnu i standardiziranu digitalnu platformu što dovodi do složenosti i visokih troškova implementacije sustava i održavanja digitalne infrastrukture. Uz sve navedeno, pitanje zaštite podataka i kibernetičke sigurnosti postaje sve važnije [30].

Zbog složenosti željezničkih sustava, u održavanju infrastrukture od iznimne je važnosti pravodobno uvesti sustave kontinuiranog praćenja i prediktivnog održavanja te osigurati njihovu široku primjenu. S obzirom na planiranu primjenu ovdje predstavljene tehnologije na tramvajskim kolosijecima s čvrstom podlogom, prediktivno održavanje dobiva na dodatnoj važnosti zbog složenosti sustava i visokih troškova održavanja. Za razliku od klasičnih kolosijeka, zahvati na kolosijecima na čvrstoj podlozi su složeniji stoga je od značaja pravovremeno predvidjeti oštećenja i spriječiti otkazivanje elemenata konstrukcije [24].

4 Zaključak

Kroz provedeni pregled literature vidljivo je kako se primjena digitalnog blizanca u području željezničke infrastrukture, posebice kod kolosijeka na čvrstoj podlozi, sve više nameće kao važna tehnologija za povećanje učinkovitosti, sigurnosti i trajnosti sustava. Istraživanja su pokazala da digitalni blizanci omogućuju realno i detaljno praćenje stvarnog stanja (dijelova) infrastrukturnog sustava, te precizne simulacije opterećenja i ponašanja sustava u različitim uvjetima eksploatacije. Time se otvara mogućnost za daljnje razvijanje prediktivnog održavanja, koje znatno smanjuje operativne troškove i povećava pouzdanost sustava.

Većina istraživanja fokusira se na sustave brze željeznice te klasične željezničke kolosijeke, dok je primjena tehnologije digitalnog blizanca za specifičnosti tramvajskih kolosijeka, poput krivina manjih radijusa, čestih aktivnosti zaustavljanja/pokretanja te prolaska kroz urbane zone, slabije istražena. Implementacija digitalnih blizanaca u održavanje tramvajske infrastrukture, posebice u urbanim sredinama gdje su ciklička opterećenja značajna, a prometni zastoji imaju važan ekonomski i društveni utjecaj, predstavlja važan korak prema digitalnoj transformaciji održavanja infrastrukture javnog prijevoza. Korištenjem stvarnih podataka i naprednih numeričkih modela moguće je detaljnije razumjeti interakciju između željezničkih vozila, kolosiječne konstrukcije i podloge, što doprinosi donošenju informiranih odluka temeljenih na analizi u realnom vremenu. Osim toga, sustavi digitalnih blizanaca omogućuju simulaciju scenarija koji bi u stvarnosti bili ekonomski zahtjevniji ili kompleksniji za provođenje, čime se dodatno podiže razina sigurnosti i otpornosti sustava.

U konačnici, digitalni blizanci ne predstavljaju samo alat za tehničku analizu, već i temelj za razvoj pametne, održive i otporne prometne infrastrukture. Njihova uloga u modernizaciji željezničke infrastrukture biti će sve značajnija kako se tehnologije senzora, umjetne inteligencije i analiza velike količine podataka budu dalje razvijale. Buduća istraživanja i razvoj trebaju se usmjeriti na razvoj detaljnih numeričkih modela kolosiječne konstrukcije, razvoj sustava za praćenje i mjerenje te daljnju integraciju opisane tehnologije u svakodnevno upravljanje i održavanje infrastrukture.

Zahvala

Ovaj rad je izrađen u sklopu projekta "URITMIS – Sustav prediktivnog održavanja urbane željezničke infrastrukture temeljen na praćenju vibroakustičnih svojstava kolosijeka" NPOO.C3.2.R2-I1.06.0001, koji se financira kao dio potpora za istraživanje i razvoj iz Nacionalnog plana oporavka i otpornosti, uz financiranje Europske komisije.

Literatura

- [1] S. Lakušić and M. Vajdić, "Kolosijeci na čvrstoj podlozi," in *Dani prometnica* 2008, Tehnički, ekonomski i ekološki aspekti, 2008, pp. 259–309.
- [2] M. Younos, "From Ballast to Slab: Transforming Rail Infrastructure for the Future," *American Journal of Construction and Building Materials*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, Mar. 2025, doi: 10.11648/j.ajcbm.20250901.11.
- [3] S. Lakušić and M. Vajdić, "Pregled suvremenih kolosiječnih konstrukcija na čvrstim podlogama," 2011.
- [4] Coenraad. Esveld, *Modern railway track*. MRT-Productions, 2001.
- [5] Y. Bezin, D. Farrington, C. Penny, B. Temple, and S. Iwnicki, "The dynamic response of slab track constructions and their benefit with respect to conventional ballasted track," in *Vehicle System Dynamics*, 2010, pp. 175–193. doi: 10.1080/00423111003693201.
- [6] E. Ntotsios, D. J. Thompson, and M. F. M. Hussein, "A comparison of ground vibration due to ballasted and slab tracks," *Transportation Geotechnics*, vol. 21, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.trgeo.2019.100256.
- [7] A. Ramos et al., "Influence of track foundation on the performance of ballast and concrete slab tracks under cyclic loading: Physical modelling and numerical model calibration," *Constr Build Mater*, vol. 277, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122245.
- [8] I. Gailiene and A. Laurinavičius, "The need and benefit of slab track: Case of Lithuania," 2017, Union of Croatian Civil Engineers and Technicians. doi: 10.14256/JCE.1776.2016.
- [9] L. Rocha and G. Gonçalves, "Digital Twins as Enablers of Predictive Maintenance in Rail Transport Services," *International Journal on Advances in Software*, vol. 17, no. 3 & 4, pp. 153–164, 2024, [Online]. Available: www.iaria.org
- [10] B. Yan et al., "Digital twin in transportation infrastructure management: a systematic review," 2023, Oxford University Press. doi: 10.1093/iti/liad024.
- [11] W. Wang et al., "Digital Twins in Operation and Maintenance," in *Digital Twin Technologies in Transportation Infrastructure Management*, Springer Nature Singapore, 2024, pp. 179–203. doi: 10.1007/978-981-99-5804-7_6.
- [12] F. Sanfilippo, R. T. Thorstensen, A. Jha, Z. Jiang, and K. G. Robbersmyr, "A Perspective Review on Digital Twins for Roads, Bridges, and Civil Infrastructures," in *International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988693.

- [13] M. Fernando Ariyachandra and A. Mrmf, "Understanding the challenge of digitally twinning the geometry of existing rail infrastructure," pp. 25–32, 2019, doi: 10.17863/CAM.47494.
- [14] S. Kaewunruen and Q. Lian, "Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems," *J Clean Prod*, vol. 228, pp. 1537–1551, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.156.
- [15] A. Kampczyk and K. Dybeł, "The fundamental approach of the digital twin application in railway turnouts with innovative monitoring of weather conditions," *Sensors*, vol. 21, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.3390/s21175757.
- [16] Y. Tchana, G. Ducellier, and S. Remy, "Designing a Unique Digital Twin for Linear Infrastructures Lifecycle Management," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2019, pp. 545–549. doi: 10.1016/j.procir.2019.04.176.
- [17] M. R. M. F. Ariyachandra and I. Brilakis, "Application of railway topology for the automated generation of geometric digital twins of railway masts," in *ECPPM 2021 – eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, CRC Press, 2021, pp. 373–380. doi: 10.1201/9781003191476-52.
- [18] C. Ye et al., "A digital twin of bridges for structural health monitoring," in *Structural Health Monitoring 2019: Enabling Intelligent Life-Cycle Health Management for Industry Internet of Things (IIOT) - Proceedings of the 12th International Workshop on Structural Health Monitoring*, DEStech Publications Inc., 2019, pp. 1619–1626. doi: 10.12783/shm2019/32287.
- [19] E. Febrianto, L. Butler, M. Girolami, and F. Cirak, "Digital twinning of self-sensing structures using the statistical finite element method," *Data-Centric Engineering*, vol. 3, no. 3, Oct. 2022, doi: 10.1017/dce.2022.28.
- [20] I. Haladin, K. Burnač, M. Baniček, K. Vranešić, and N. Trifunović, "The possibility of using machine learning for network-wide predictive maintenance on urban railway tracks - URITMIS project overview," in *8th International Conference on Road and Rail Infrastructure*, May 2024. doi: <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2024.1510>.
- [21] I. Haladin, K. Vranešić, and K. Burnač, "Monitoring stanja tračničke infrastrukture na temelju podataka prikupljenih konvencionalnim tračničkim vozilima," *Dani HKIG*, Opatija, 2023.
- [22] Á. Vinkó and P. Bocz, "Experimental investigation on condition monitoring opportunities of tramway tracks," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 62, no. 1, pp. 180–190, 2018, doi: 10.3311/PPci.10541.
- [23] Y. T. Mulyadi, M. Rifqi, R. Putra, Y. Yunazwin Nazaruddin, and M. I. Mandasari, "Digital Twin Model Development for Autonomous Tram Localization," 2022.

- [24] G. Bianchi, C. Fanelli, F. Freddi, F. Giuliani, and A. La Placa, "Systematic review railway infrastructure monitoring: From classic techniques to predictive maintenance," Jan. 01, 2025, SAGE Publications Inc. doi: 10.1177/16878132241285631.
- [25] G. D. Doubell, A. H. Basson, K. Kruger, and P. D. F. Conradie, "A Digital Twin System for Railway Infrastructure," R&D Journal, Aug. 2023, doi: 10.17159/2309-8988/2023/v39a3.
- [26] M. H. Le-Nguyen, F. Turgis, P. E. Fayemi, and A. Bifet, "Real-time learning for real-time data: online machine learning for predictive maintenance of railway systems," in Transportation Research Procedia, Elsevier B.V., 2023, pp. 171–178. doi: 10.1016/j.trpro.2023.11.391.
- [27] L. De Donato et al., "Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture," J Reliab Intell Environ, vol. 9, no. 3, pp. 303–317, Sep. 2023, doi: 10.1007/s40860-023-00208-6.
- [28] S. Ma, K. A. Flanigan, and M. Bergés, "State-of-the-Art Review: The Use of Digital Twins to Support Artificial Intelligence-Guided Predictive Maintenance," Jun. 2024, doi: 10.48550/arXiv.2406.13117.
- [29] O. Serradilla, E. Zugasti, J. Rodriguez, and U. Zurutuza, "Deep learning models for predictive maintenance: a survey, comparison, challenges and prospects," Applied Intelligence, vol. 52, no. 10, pp. 10934–10964, Aug. 2022, doi: 10.1007/s10489-021-03004-y.
- [30] W. A. Ali, M. Roccotelli, and M. P. Fanti, "Digital Twin in Intelligent Transportation Systems: a Review," in 2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2022, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 576–581. doi: 10.1109/CoDIT55151.2022.9804017.