

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.12>

Razvoj numeričkog modela tramvajske kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT

Development of a Numerical Model of the Slab Tram Track Structure Zagreb 21-STT

Franka Meštrović¹, Ivo Haladin¹

(1) Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, fmestrovic@grad.hr, ihaladin@grad.hr

Sažetak

Razvoj prometne infrastrukture predstavlja ključni preduvjet za održivu mobilnost u urbanim sredinama, pri čemu željeznički sustavi zauzimaju sve važniju ulogu uslijed energetske učinkovitosti i kapaciteta. U tom kontekstu ističe se potreba za naprednim pristupima održavanju, među kojima se prediktivno održavanje ističe kao jedno od najperspektivnijih rješenja. Primjenom tehnologije digitalnog blizanca - virtualnog modela stvarnog sustava koji se kontinuirano ažurira operativnim podacima - moguće je unaprijed identificirati znakove degradacije, smanjiti broj iznenadnih kvarova i optimizirati troškove održavanja. Ključni preduvjet za razvoj takvog sustava je uspostava pouzdanog numeričkog modela. U tijeku je razvoj numeričkog modela kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT, koji će omogućiti analizu dinamičkog odziva konstrukcije i poslužiti kao osnova za daljnja istraživanja u smjeru integracije tehnologije digitalnog blizanca i implementacije prediktivnog održavanja.

Ključne riječi: tramvajski kolosijek, numerički model, kolosijeci na čvrstoj podlozi, digitalni bliznac, prediktivno održavanje

Abstract

The development of transport infrastructure is a key prerequisite for sustainable mobility in urban environments, with railway systems playing an increasingly important role due to their energy efficiency and capacity. In this context, the need for advanced maintenance approaches is highlighted, among which predictive maintenance stands out as one of the most promising solutions. By applying digital twin technology - a virtual model of a real system continuously updated with operational data - it is possible to identify signs of degradation in advance, reduce the number of unexpected failures, and optimize maintenance costs. A crucial prerequisite for the development of such a system is the establishment of a reliable numerical model. Currently, a numerical model of the Zagreb 21-STT slab track structure is being developed, which will enable the analysis of the dynamic response of the structure and serve as a basis for further research in the direction of integrating digital twin technology and implementing predictive maintenance.

Keywords: tram track, numerical model, slab track, digital twin, predictive maintenance

1. Uvod

Kontinuirani rast prometnog opterećenja u urbanim sredinama tijekom posljednjih nekoliko desetljeća rezultirao je produljenjem vremena putovanja, smanjenja dostupnosti parkirnih mjesta te povećanjem nezadovoljstva građana. Kao jedno od mogućih rješenja za navedene izazove, potrebno je prioritzirati razvoj javnog gradskog prijevoza. Tramvajski sustav predstavlja ključnu komponentu javnog gradskog prijevoza u Gradu Zagrebu. Tijekom 2025. godine započela je realizacija projekta rekonstrukcije Sarajevske ulice, u sklopu kojeg je predviđeno prvo proširenje tramvajske mreže nakon 20 godina. Uz proširenje tramvajske mreže, paralelno se provodi obnova voznog parka Zagrebačkog električnog tramvaja (ZET). U sklopu modernizacije, aktualna je isporuka najnovijih modela potpuno niskopodnih tramvaja TMK2400, koje proizvodi tvrtka Končar. Vozilo TMK2400 (Slika 1) u pogledu koncepta, rasporeda i razmaka između postolja te dimenzija sanduka potpuno odgovara tramvajskom vozilu TMK2300.

Tijekom radoblja od 2005. - 2010. godine, tvrtka Končar u suradnji sa ZET-om isporučila je 142 potpuno niskopodna tramvajska vozila [1]. Modernizacijom tadašnjeg voznog parka, implementacija modela TMK2200 i TMK2300 uzrokovala je niz promjena na tramvajskoj infrastrukturi. Na razini djelovanja na kolosiječnu konstrukciju, glavne promjene uključivale su povećanje i promjenu distribucije osovinskog opterećenja na konstrukciju, te izmjenu tipa kotača tramvajskih vozila, što je uzrokovalo promjenu u geometriji kontaktne površine kotača i tračnice. Navedeno je rezultiralo učestalim oštećenjima sustava pričvršćenja, ubrzanom degradacijom kolosiječne geometrije i povećanjem istrošenosti tračnica, što je zahtijevalo revalorizaciju parametara kolosiječne konstrukcije [2].



Slika 1. Tramvajsko vozilo TMK2400

Obzirom na navedene izazove, kroz suradnju Fakulteta građevinarstva Sveučilišta u Zagrebu i ZET-a d.o.o. razvijeni su novi kolosiječni sustavi, koristeći iskustva stečena na prethodnim projektima unaprjeđenja vibro-akustičkih svojstava i trajnosti kolosijeka [2]. Između razvijanih sustava odabrana su 2 za daljnja ispitivanja: Zagreb 21-CTT i Zagreb 21-STT kolosiječni sustavi. Ključni izazovi pri projektiranju uključivali su smanjenje razina vibracija i dinamičkih opterećenja na kolosijek te smanjenje razina buke u urbanim područjima. Kako bi se osigurala funkcionalnost razvijenih inovativnih rješenja u uvjetima

eksploatacije, izvedena je ispitna dionica, na kojoj su provedena kontinuirana mjerenja geometrije kolosijeka, naprezanja i deformacija te vibracija i akustičkih parametara. Uz navedeno, redovito se provodio vizualni pregled stanja ključnih elemenata kolosijeka kako bi se osigurala pravovremena detekcija oštećenja [3]. Rezultati mjerenja pokazuju kako sustav Zagreb 21-STT zadovoljava i nalazi se unutar graničnih vrijednosti prema svim promatranim parametrima [4]. Nastavno na izazove uslijed obnove voznog parka, promjena uočenih na infrastrukturi te uspješnu ugradnju i povoljne rezultate monitoringa [3], predviđena je implementacija nove kolosiječne konstrukcije prilikom proširenja tramvajske mreže.

2. Prediktivno održavanje kolosijeka pomoću digitalnog blizanca

Digitalni blizanac predstavlja virtualni model fizičkog sustava koji se kontinuirano ažurira podacima iz stvarnog okruženja. U području željezničkih kolosijeka, digitalni blizanac integrira podatke prikupljene senzorima na konstrukciji i/ili vozilu sa virtualnim numeričkim modelom konstrukcije [5]. Implementacija ovakvog pristupa omogućuje kontinuirano praćenje stanja (elemenata) kolosijeka, pravovremenu identifikaciju potencijalnih oštećenja i znakova degradacije te definiranje optimalnog trenutka za pristup održavanju. Također, važna značajka digitalnog blizanca je mogućnost simulacije scenarija i istraživanja utjecaja parametara geometrije i materijala na ponašanje kolosijeka i predviđanje odziva konstrukcije pri različitim opterećenjima u eksploataciji. Primjena navedene tehnologije u željezničkoj infrastrukturi još je u fazi razvoja, ali brojni primjeri iz literature pokazuju njihov potencijal za unaprjeđenje učinkovitosti održavanja i sigurnosti prometa [5-7].

Implementacija tehnologije digitalnog blizanca u sustave praćenja infrastrukture otvara niz mogućnosti za prediktivno održavanje, koje se temelji na analizi podataka u stvarnom vremenu, korištenju umjetne inteligencije te naprednih analitičkih metoda, kao što su algoritmi strojnog i dubokog učenja [8]. Za razliku od reaktivnog i preventivnog, prediktivno održavanje omogućuje pravovremenu identifikaciju degradacije ili oštećenja, čime se smanjuje rizik od iznenadnih kvarova i optimizira raspored aktivnosti održavanja [9]. Iako su istraživanja primjene navedenih tehnologija za tramvajske kolosiječne sustave još uvijek u povojima, sve veći broj radova temelji se na spoznajama i metodološkim pristupima razvijenima kroz istraživanja na klasičnim željezničkim sustavima [10,11]. Istraživački projekt URITMIS, usmjeren na implementaciju sustava za prediktivno održavanje tramvajske infrastrukture, temelji se na analizi vibro-akustičkih signala prikupljenih senzorima postavljenim na okvir voznog postolja tramvaja koji sudjeluje u redovitom prometu. Navedeno je od posebne važnosti jer se podaci prikupljaju u realnim uvjetima eksploatacije, pri čemu se operativna mjerenja kombiniraju s diskretnim mjernim kampanjama, čime se omogućuje sveobuhvatniji uvid u ponašanje kolosiječne konstrukcije. U trenutnoj fazi istraživanja, fokus je na eksperimentalnoj validaciji razvijenih metodologija. Karakterizacija dinamičkog ponašanja vozila provodi se analizom transfer funkcija kotača i okvira postolja, čime se omogućuje identifikacija i kvantifikacija geometrijskih nepravilnosti tračnica na temelju signala ubrzanja prikupljenih tijekom eksploatacije [5,6]. Razvoj algoritama za detekciju temelji se na primjeni naprednih metoda obrade signala i strojnog učenja, s posebnim naglaskom na automatsku evaluaciju kvalitete zavora i detekciju lokalnih oštećenja [7]. Obzirom na navedene aktivnosti, sljedeći korak uključuje razvoj numeričkog

modela tramvajske kolosiječne konstrukcije, kako bi se istražio i analizirao utjecaj pojedinih komponenata sustava i vanjskih djelovanja na dinamički odziv konstrukcije.

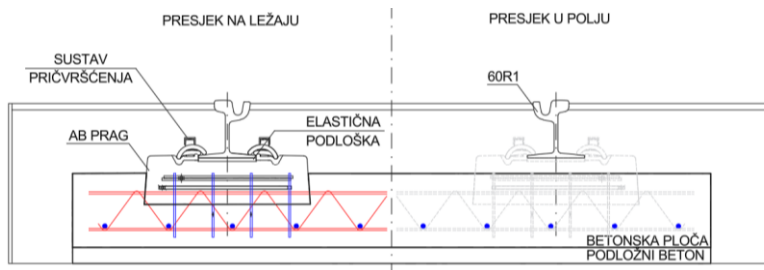
3. Tramvajski kolosijeci na čvrstoj podlozi

Tramvajski sustavi razlikuju se od klasične željeznice po nižim brzinama prometovanja, kraćim međustaničnim udaljenostima koje uvjetuju učestalija zaustavljanja, mogućnosti savladavanja krivina manjeg polumjera zbog povoljnije integracije u urbani prostor te dijeljenjem prometne površine sa cestovnim vozilima. Kolosijeci na čvrstoj podlozi, osobito primijenjeni u tramvajskim sustavima, ističu se kao vrijedno rješenje za modernizaciju gradskih prometnih sustava uslijed svojih tehničko-eksploatacijskih prednosti. Zamjenom klasične zastorne prizme betonskim ili asfaltnim podlogama povećana je stabilnost, točnost geometrije i otpornost na dinamička opterećenja, što smanjuje potrebu za učestalim aktivnostima održavanja. Manja visina i masa konstrukcije olakšavaju integraciju u urbana područja, dok upotreba modularnih elemenata dodatno ubrzava izgradnju i smanjuje troškove. Međutim, uslijed povećanja krutosti sustava, utjecaj buke i vibracija na okolinu i dalje predstavlja značajan izazov. Nadalje, izazovi proizlaze iz osjetljivosti konstrukcije na slijeganje tla, što može uzrokovati narušavanje geometrije kolosijeka i kao posljedicu imati potrebu za tehnički složenim i financijski zahtjevnim sanacijama [12].

4. Kolosiječna konstrukcija Zagreb 21-STT

Zagreb 21-STT (eng. *Slab Tram Track*) je inovativna tramvajska kolosiječna konstrukcija, koja omogućuje brzu i jednostavnu ugradnju pomoću predgotovljenih dvodijelnih armiranobetonskih pragova postavljenih na sloj podložnog betona. Pragovi su povezani armaturnim elementima, dok se između tračnice i praga koriste elastične podloške za prigušenje vibracija. Kolosijek se precizno pozicionira po visini i smjeru pomoću betonskih blokova i provizornih spojnica. Nakon dotjerivanja geometrije, izvodi se nosiva ploča od betona, ojačana vlaknima, uz strogo kontrolirane uvjete ugradnje i zaštite. Slika 2 prikazuje poprečni presjek kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT na ležaju i u polju.

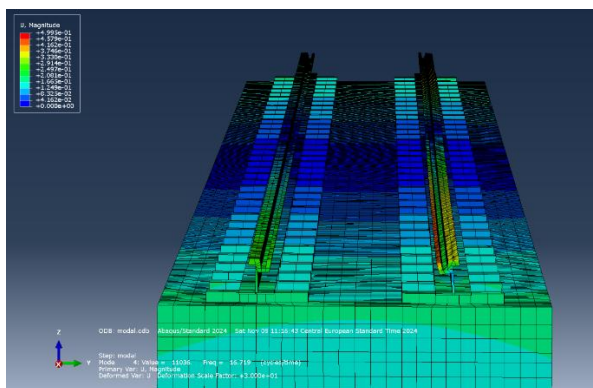
Sustav pričvršćenja Zagreb 21-STT sastoji se od elastične pritiskalice SKL14, kutne pločice Wfp 14K 12, tirfon vijka SS35, podloške ULS7 i tiple SDU 25 tirfon vijka te elastične podtračničke podloške. Za svaki element sustava, osim elastične podloške, koriste se po dvije komponente na svakom pričvršnom mjestu.



Slika 2. Presjek sustava Zagreb 21-STT na ležaju i u polju

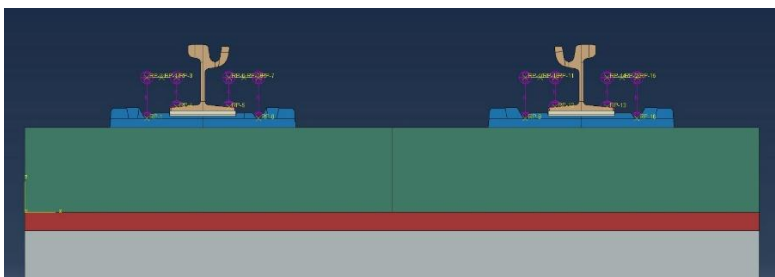
5. Razvoj modela tramvajskog kolosijeka na čvrstoj podlozi

Nastavno na razvoj kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT [2] te na postignutu razinu istraživanja u okviru projekta URITMIS [13], predviđen je daljnji razvoj numeričkog modela kolosijeka s ciljem analize utjecaja parametara i eksploatacijskih opterećenja na dinamički odziv i ponašanje konstrukcije. Cilj istraživanja jest uspostava numeričkog modela koji će omogućiti kontinuirano praćenje stanja konstrukcije i razvoj prediktivnog sustava održavanja temeljenog na tehnologiji digitalnog blizanca. Prva faza ovog istraživanja obuhvaća izradu detaljnog numeričkog modela kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT, te se nastavlja na rad [14] u okviru kojeg su provedene numeričke analize modalnih oblika, te proračuni naprezanja i deformacija, primjenom metode konačnih elemenata. Rezultati su pokazali da su naprezanja i deformacije unutar dopuštenih granica, pri čemu elastična podtračnička podloška značajno doprinosi smanjenju razina naprezanja [14].



Slika 3. Prikaz rezultata modalne analize kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT [14]

Sljedeća faza istraživanja obuhvaća pojednostavljenje sustava pričvršćenja modeliranjem pomoću sustava opruga (Slika 4), pri čemu se koeficijent elastičnosti opruga definira na temelju vrijednosti dobivenih u prethodnim istraživanjima [15]. Ova aproksimacija opravdana je visokom razinom složenosti koja bi uslijedila modeliranjem detaljne geometrije pojedinih elemenata pričvršćenja, duljinom trajanja numeričkih analiza te ciljanom razinom točnosti koja je dovoljna za planiranu parametrizaciju i karakteristike konstrukcije koje se ispituju.



Slika 4. Modeliranje sustava pričvršćenja

Brojna istraživanja u području tramvajske infrastrukture temelje se na kombinaciji terenskih mjerenja i numeričkih modela, čime se omogućuje validacija i kalibracija modela za realne

uvjete. Nastavno, dan je sažet pregled relevantnih istraživanja iz ovog područja kako bi se postavio temelj za buduća terenska ispitivanja i daljnja istraživanja. U recentnoj literaturi uobičajen je pristup u kojem se eksperimentalna mjerenja – na vozilu, u laboratoriju ili na realnom kolosijeku – koriste za dobivanje uvida u dinamičko ponašanje sustava, poput vibracija, slijeganja ili interakcije kotača i tračnica. Ti se podaci zatim analiziraju i uspoređuju s rezultatima numeričkog modeliranja kako bi se validirao model, analizirali odabrani parametri kolosijeka ili optimizirala rješenja za prigušenje vibracija. Takav pristup, koji se temelji na korelaciji između izmjerenih i simuliranih podataka, omogućuje pouzdaniju procjenu stvarnog stanja kolosijeka i precizniju kalibraciju numeričkih modela, te se sve češće koristi u analizi tramvajskih i željezničkih sustava [16-19].

6. Zaključak

U cilju osiguranja održivosti i učinkovitosti tramvajske infrastrukture, te obzirom na porast prometnih opterećenja razvijani su novi sustavi tramvajskih kolosijeka na čvrstoj podlozi, među kojima se ističe sustav Zagreb 21-STT. Primjenom ovog sustava povećana je postojanost geometrije kolosijeka uz istovremeno smanjenje učestalosti održavanja. Temeljem dosadašnjih rezultata ispitivanja i monitoringa kolosijeka, ovaj sustav pokazuje zadovoljavajuće performanse u pogledu dinamičkog odziva i otpornosti na opterećenja, što ga čini pogodnim za daljnju implementaciju.

S ciljem dodatnog unaprjeđenja održavanja infrastrukture, u tijeku je razvoj numeričkog modela kolosiječne konstrukcije Zagreb 21-STT, koji će poslužiti kao temelj za implementaciju tehnologije digitalnog blizanca i razvoj strategije prediktivnog održavanja. Ipak, za daljnje unapređenje ovakvih rješenja nužno je usmjeriti istraživanja prema razvoju detaljnog numeričkog modela koji bi obuhvatio sve relevantne parametre materijala, opterećenja i okoline, kao i njegovoj kalibraciji kroz detaljna terenska mjerenja vibracija, deformacija, naprezanja i opterećenja.

Nadalje, potrebno je provesti parametarske analize kako bi se utvrdio utjecaj pojedinačnih varijabli na dugotrajnost i ponašanje konstrukcije, te kontinuirano prikupljati podatke korištenjem sustava senzora za praćenje ponašanja u eksploataciji. Razvoj algoritama za predviđanje oštećenja i optimizaciju aktivnosti održavanja infrastrukture temeljiti će se na primjeni umjetne inteligencije i strojnog učenja, a ostvariti će se kroz interdisciplinarnu suradnju stručnjaka iz područja građevinarstva, prometa i informatike.

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] „Potpisan novi ugovor sa ZET-om o kupoprodaji 20 tramvaja | Končar“. Pristupljeno: 06. svibanj 2025. [Na internetu]. Dostupno na: <https://koncar.hr/hr/vijesti/potpisan-novi-ugovor-sa-zet-om-o-kupoprodaji-20-tramvaja>

- [2] S. Lakušić, I. Haladin, i M. Ahac, „The effect of rail fastening system modifications on tram traffic noise and vibration“, *Shock and Vibration*, sv. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/4671302.
- [3] S. Lakušić, I. Haladin, i J. Koščak, „Izveštaj o monitoringu sustava pričvršćenja tramvajskog kolosijeka „Zagreb 21-CTT“ i „Zagreb 21-STT“ na Savskoj cesti u Zagrebu“, 2015.
- [4] I. Haladin, S. Lakušić, J. Koščak, i M. Bartolac, „Monitoring of Dynamic Properties of New Type of Tram Track Fastening Systems Under Traffic Load“, u *4th International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2016*, Šibenik: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagreb, svi. 2016, str. 791–799.
- [5] B. Yan i ostali, „Digital twin in transportation infrastructure management: a systematic review“, 2023., *Oxford University Press*. doi: 10.1093/iti/liad024.
- [6] E. Krmac i B. Djordjevic, „Digital Twins for Railway Sector: Current State and Future Directions“, *IEEE Access*, sv. 12, str. 108597–108615, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3439471.
- [7] L. Rocha i G. Gonçalves, „Digital Twins as Enablers of Predictive Maintenance in Rail Transport Services“, *International Journal on Advances in Software*, sv. 17, izd. 3 & 4, str. 153–164, 2024, [Na internetu]. Dostupno na: www.iaia.org
- [8] J. Sresakoolchai i S. Kaewunruen, „Railway infrastructure maintenance efficiency improvement using deep reinforcement learning integrated with digital twin based on track geometry and component defects“, *Sci Rep*, sv. 13, izd. 1, pros. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-29526-8.
- [9] G. Bianchi, C. Fanelli, F. Freddi, F. Giuliani, i A. La Placa, „Systematic review railway infrastructure monitoring: From classic techniques to predictive maintenance“, 01. siječanj 2025., *SAGE Publications Inc.* doi: 10.1177/16878132241285631.
- [10] Á. Vinkó i P. Bocz, „Experimental investigation on condition monitoring opportunities of tramway tracks“, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, sv. 62, izd. 1, str. 180–190, 2018, doi: 10.3311/PPci.10541.
- [11] Y. T. Mulyadi, M. Rifqi, R. Putra, Y. Yunazwin Nazaruddin, i M. I. Mandasari, „Digital Twin Model Development for Autonomous Tram Localization“, 2022.
- [12] S. Lakušić i M. Vajdić, „Kolosijeci na čvrstoj podlozi“, u *Dani prometnica 2008, Tehnički, ekonomski i ekološki aspekti*, 2008, str. 259–309.
- [13] I. Haladin, K. Burnać, M. Baniček, K. Vranešić, i N. Trifunović, „The possibility of using machine learning for network-wide predictive maintenance on urban railway tracks - URITMIS project overview“, u *8th International Conference on Road and Rail Infrastructure*, svi. 2024. doi: <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2024.1510>.
- [14] T. Tunjić, „Numerički proračun tramvajske kolosiječne konstrukcije na čvrstoj podlozi“, Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2024.
- [15] M. Baniček, „Utjecaj promjene geometrije pritiskalica za pričvršćenje tračnica na mehaničko ponašanje sustava pričvršćenja“, Doktorska disertacija. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2022.
- [16] K. Burnać i I. Haladin, „Experimental analysis of wheel and bogie frame transfer functions for on-board measurements of rail roughness“, *INTER-NOISE and NOISE-*

- CON Congress and Conference Proceedings, sv. 270, izd. 5, str. 6968–6976, lis. 2024, doi: 10.3397/IN_2024_3894.
- [17] A. Ramos *i ostali*, „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*, sv. 277, ožu. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122245.
- [18] J. S. Theyssen *i ostali*, „Calibration and validation of the dynamic response of two slab track models using data from a full-scale test rig“, *Eng Struct*, sv. 234, svi. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.111980.
- [19] C. Kraśkiewicz, M. Urbaniak, i A. Piotrowski, „Experimental Study on the Elastic Support in a Discrete Rail Fastening System Used in Ballastless Tram Track Structures“, *Materials*, sv. 18, izd. 1, sij. 2025, doi: 10.3390/ma18010141.