

Utjecaj kvalitete geometrije kolosijeka na učinke tramvajskog prometnog sustava

Igor Majstorović¹, doc.dr.sc. Maja Ahac²

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

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

Sažetak

U ovome radu prikazan je, na primjeru tramvajskog sustava Grada Osijeka, utjecaj degradacije kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka na brzinu putovanja tramvajskog vozila, tj. na promjenu prometne ponude te posljedično na prometnu potražnju. Promjena kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka tijekom uporabe ima izravan utjecaj na smanjenje brzine kretanja tramvajskog vozila, tj. na povećanje trajanja putovanja tramvajem. Posljedično, promjena kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka utječe na promjenu razine usluge, te konačno na promjenu broja korisnika tramvajskog prometnog sustava. Planiranjem i pravovremenim održavanjem tramvajskog kolosijeka moguće je smanjiti negativne utjecaje promjene kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka na učinke tramvajskog prometnog sustava.

Ključne riječi: geometrija kolosijeka, tramvajski sustav, brzina putovanja, prometni pokazatelji, operativni pokazatelji, modeliranje

Effect of track geometry quality on tram transport system indicators

Abstract

This paper shows, on the example of the tram system operated in the city of Osijek, the effect of the quality of tram track geometry on the tram travel speed, i.e. on the change in transport supply and, consequently, in transport demand. Degraded quality of the tram track geometry has a direct impact on tram speed and, hence, on the increase in travel time. Consequently, degraded quality of track geometry affects the level of service and, finally, the number of passengers in the tram transport system. Negative impacts of the tram track geometry degradation on proper operation of the tram transport system can be reduced by proper planning and timely maintenance of tram tracks.

Key words: track geometry, tram system, travel speed, transport indicators, operating indicators, modelling

1 Uvod

Učinkovito praćenje i kontrola voznog reda, u realnom vremenu i planiranoj budućnosti, odavno je prepoznato kao ključni preduvjet za održavanje visoke kvalitete usluge na visokofrekventnim i visokokapacitetnim gradskim tračničkim sustavima. Ključan podatak na temelju kojeg se određuje vozni red linije jest brzina putovanja. Na postojećem sustavu ova brzina je rezultat prometnih učinaka ponude i potražnje u vremenu promatranja, a izračunava se iz omjera dviju mjerljivih varijabli, prijeđenog puta i ukupnog vremena putovanja vozila na dionici (uzimajući u obzir i vrijeme stajanja vozila bez obzira na razlog).

U slučaju planiranja novog sustava ili promjena prometne ponude i/ili potražnje u sustavu javnog ili individualnog prijevoza putnika (kao posljedice promjena u društvu, ekonomiji, namjeni prostora ili putnih navika) izračun voznog reda provodi se mehaničko-empirijskim metodama. Pomoću procijenjenih vrijednosti brzine vožnje izračunava se inicijalni vozni red koji se zatim korigira ovisno o uporabnim prometnim karakteristikama.

U ovome radu dan je pregled postojećih modela predviđanja brzine putovanja, te je na primjeru tramvajskog sustava Grada Osijeka prikazan utjecaj promjene kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka na brzinu putovanja tramvajskog vozila, odnosno na promjenu prometne ponude te posljedično na prometnu potražnju.

2 Modeli predviđanja brzine (vremena) putovanja

Na tračničkim se sustavima procjena brzine putovanja duž dionica kolosijeka temelji na smanjenju projektne brzine uslijed osnovnih otpora trase i vozila, s obzirom na planirano ili zatečeno stanje kolosijeka i voznog parka, te dodatnih otpora koji se povremeno javljaju duž trase, a izražavaju se kroz vremenske gubitke vozila na stajalištima (otpori stajališta) i ispred signala za regulaciju prometa (otpori raskrižja).

Razvojem računalnih programa i komunikacijskih sredstava, grubo predviđanje vremena putovanja javnim prijevozom pri osmišljavanju učinkovitog planiranja putovanja u sve težim prometnim uvjetima dobiva sve više na važnosti. Do danas su razvijeni brojni novi pristupi o predviđanju brzine i vremena putovanja koji se uglavnom oslanjaju na različite statističke modele ili tehnike strojnog učenja. Modeli predviđanja vremena putovanja dijele se u tri glavne skupine: jednostavni modeli koji se temelje na povijesnim podacima, odnosno na opservaciji da su vremena putovanja ponovljiva između dana, u isto vrijeme dana i istog dana u tjednu (1); statistički modeli koji koriste utjecajne parametre kao nezavisne varijable i predviđaju vrijeme ili brzinu putovanja na temelju njihovih statističkih distribucija i korelacija (2); modeli strojnog učenja (neuronske mreže, strojevi za vektorsku podršku i hibridni modeli)

koji provode proces učenja na postojećim podacima o vremenu putovanja kako bi pronašli odgovor za nepoznate ulazne podatke (3) [1].

Najnovija istraživanja identificirala su nepouzdanost u vremenima zadržavanja tramvaja na stajalištu kao osnovni problem pri modeliranju putovanja u suvremenim tramvajskim sustavima [2]. Međutim, studije o vremenu zadržavanja tramvaja na stajalištima koje su provedene kako bi se utvrdile uzročno-posljedične veze, tj. na koji način na to vrijeme utječe niz utjecajnih parametara, još uvijek su malobrojne [3] i daju dvosmislene rezultate. Istraživanja o vremenima zadržavanja na stajalištima pokazala su da vrijeme zadržavanja na stajalištu ovisi o količini putničkog prometa na stajalištu, količini izmjene putnika, kapacitetu stajališta, visini poda i širini vrata vozila, vremenu potrebnom za otvaranje i zatvaranje vrata, dužini vozila te sustavu naplate vozarine tj. vremenu koje putnici provode kod vozača, dobu dana (prometno vršno ili izvanvršno razdoblje), lokaciji stajališta (unutar ili izvan gradskog središta, udaljenost stajališta od putnicima interesantnih lokacija), a na njega utječu i vremenske prilike. Također, postoji manjak operativne simetrije između pravaca linije: stajališta različitih smjerova iste linije pokazuju različite trendove vremena zadržavanja [4, 5]. Postoje značajne razlike između vremena zadržavanja tramvaja sa prikolicom i bez nje, zbog neujednačene raspodjele kretanja putnika i opterećenja putnicima. Također, opažene su velike poteškoće u tramvajskom prometu ako stajalište opslužuju tramvaji različitih duljina. Ako se razmak između tramvaja strogo ne kontrolira, vrlo je vjerojatno da će kraći tramvaji biti jako opterećeni putnicima i stoga voziti sporije od duljih [6]. Raspodjela putnika duž stajališnog perona ovisi o njegovoj izvedbi i ima značajan utjecaj na vrijeme izmjene putnika. Većina putnika već pri čekanju vozila na stajalištu zauzima poziciju koja odgovara lokaciji vrata kroz koja će u budućnosti izaći iz vozila, a to dovodi do vrlo izražene nejednake raspodjele putnika duž stajališta i preopterećenja pojedinačnih tramvajskih vrata, što značajno produžuje putovanje [7].

Navedene nepouzdanosti u graničnim vrijednostima vremena zadržavanja na stajalištu predstavljaju velik problem na dugim linijama javnog prijevoza s uzastopnim stajalištima na malim udaljenostima, uobičajenim na tramvajskim sustavima. Što je veći broj stajališta, veća je nepouzdanost vremena zadržavanja, a nepouzdanosti vremena zadržavanja na svakom stajalištu će se zbrajati i tako znatno utjecati na pouzdanosti vremena dolaska vozila na sljedeću stanicu. Dodatno, vrijeme čekanja vozila na raskrižju znatno utječe na vrijeme putovanja. Suvremeni tramvaji obično su duži od 20 m, a duže vozilo znači i duže vrijeme prolaska vozila kroz raskrižje. Vrijeme prolaska i vremenski razmak vozila različiti su za različite tramvaje i ovise o njihovoj brzini i ubrzanju, ali i o oblikovnoj geometriji raskrižja, uvjetima prometne signalizacije, prometnim karakteristikama tokova na raskrižju, rangu ulica koje čine raskrižje i periodu dana [2]. Pregled stanja područja pokazao je kako na pouzdanost modela i predviđanja brzine putovanja javnog gradskog prijevoza utječe mnogo utjecajnih parametara. Mali broj

modela stvorenih za izračunavanje brzine putovanja tramvajima koristi niz pretpostavki, pojednostavljenja i ograničenja. U tim su modelima različiti utjecajni parametri, koji utječu na kretanje tramvaja, sažeti i/ili zanemareni s obzirom na dostupnost podataka iz sekundarnih izvora, kao i metode te uređaje koji su korišteni za prikupljanje podataka na terenu i naknadnu obradu i analizu podataka. Primjerice, Lückerath i suradnici [8] izradili su model s pretpostavkom da se u svakom trenutku na stajalištu može zaustaviti samo jedan tramvaj, te da su vremena zadržavanja specifična za stanicu i vrstu tramvaja, ali i da su uvijek minimalna. Wang i suradnici [2] pretpostavili su da se brzina putovanja tramvaja može osigurati zasebnim trakovima i da je tada konstantna na cijeloj trasi. Zychowski i suradnici [9] razvili su model u kojem ukupno vrijeme putovanja tramvajem uključuje i vrijeme zaustavljanja i čekanja tramvaja na stanicama i raskrižjima. Lai i Leung [10] predložili su brojne matematičke modele za revidiranje voznog reda tramvaja u stvarnom vremenu, u kojima su pretpostavili da je vrijeme zadržavanja na svakoj od krajnjih stanica minimalno i da se vozni park sastoji od identičnih tramvaja koji se grupiraju u koloni samo pred spremištima.

Dosadašnja istraživanja pokazala su međuzavisnost brzine vožnje tramvaja i geometrije tramvajskog kolosijeka kao osnovne mjere stanja kvalitete kolosijeka [11]. Što je veća brzina tramvaja na dionici kolosijeka, to će napredak degradacije geometrije biti više izražen. Uslijed pogoršanja kvalitete geometrije konstrukcije postupnim smanjivanjem brzine tramvaja nastoji se zadržati inicijalna razina sigurnosti i udobnosti putovanja. Ipak, zbog velikog broja prometnih parametara koji utječu na brzinu tramvaja, stupanj korelacije između brzine putovanja i degradacije kvalitete geometrije (kao konstrukcijskog parametra otpora trase) nije jednoznačno utvrđen.

3 Ocjena kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka

Pregledom stanja područja nisu pronađena istraživanja u kojima bi se pokušao uključiti utjecaj degradacije kvalitete tramvajskih kolosijeka (tj. postupno povećanje komponente otpora kolosijeka tijekom uporabe) na brzinu kretanja tramvaja, najvjerojatnije zbog sljedećih činjenica:

1. Postoji desetak različitih pristupa obradi podataka mjerenja geometrije kolosijeka radi uvida u stanje kvalitete, no kriteriji za ocjenjivanje kvalitete dani su najčešće za klasične željezničke sustave i razlikuju se između uprava [12];
2. Iako je razvoj procesa prikupljanja i pohrane velikog broja povijesnih podataka o geometriji kolosijeka prouzročio razvoj velikog broja različitih pristupa modeliranja njihove degradacije, modeli se uglavnom usredotočuju na pojedinačni element tračničkog sustava, a njihovi rezultati se oslanjaju na ograničeni broj parametara i razmatraju samo jedan od mnogih aspekata degradacije kolosijeka. Zbog toga ne mogu pružiti temeljitu naznaku svih utjecajnih parametara i njihove uloge u degradaciji kolosijeka [13];

3. Istraživanja koja se bave razvojem kriterija za ocjenjivanje kvalitete i modela degradacije geometrije tramvajskih kolosijeka, koji se konstrukcijski i eksploatacijski znatno razlikuju od klasičnih željezničkih i metro sustava, iako sve brojnija, još uvijek su u začecima [14], najviše zbog lošeg dokumentiranja povijesnih podataka o sustavima [15].

Prema Europskoj normi 13848-1 [16], ocjena kvalitete geometrije kolosijeka temelji se na analizi pet parametara: širine kolosijeka G , visinskog odnosa tračnica u pravcu ili nadvišenja u krivini C , vitoperenju kolosijeka T , smjeru kolosijeka H i razini tračnica V . Prema navedenoj normi, pri ocjeni kvalitete geometrije kolosijeka potrebno je promatrati standardne devijacije izmjerenih parametara geometrije, no prema istraživanju autora [17, 18], ovo nije odgovarajući pokazatelj kvalitete geometrije različitih dionica trase kolosijeka, primjerice između stanica, koji bi mogao poslužiti za holističku analizu i ocjenu učinka kvalitete kolosijeka na brzinu putovanja.

Prema [19], prilikom ocjene kvalitete geometrije kolosijeka potrebno je uzeti u obzir ukupan istodobni učinak svih pet izmjerenih vrijednosti parametara geometrije duž pojedine dionice kolosijeka, tzv. sintetizirani pokazatelj kvalitete geometrije kolosijeka W_5 . To je svojevrsni indeks kvalitete geometrije kolosijeka, bezdimenzijska računrska vrijednost, karakteristična za svaku analitičku dionicu kolosijeka, određena sljedećim izrazom:

$$W_5 = 1 - (1 - W_G) (1 - W_C) (1 - W_T) (1 - W_H) (1 - W_V) \quad (1)$$

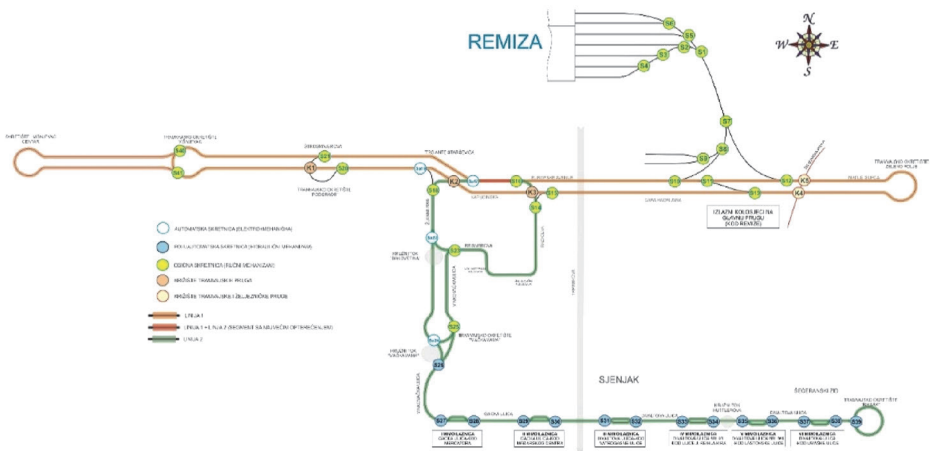
Jednadžba tretira odstupanja pojedinog parametra kao neovisan događaj, gdje W_G predstavlja pokazatelj kvalitete širine kolosijeka, W_C pokazatelj kvalitete visinskog odnosa tračnica, W_T pokazatelj kvalitete vitoperenja kolosijeka, W_H pokazatelj kvalitete horizontalnih nepravilnosti i W_V pokazatelj kvalitete vertikalnih nepravilnosti. Ti pojedinačni pokazatelji stanja duž određene dionice definirani su izrazom:

$$W_i = \frac{N_p}{N} \quad (2)$$

gdje W_i predstavlja pokazatelj stanja kvalitete promatranog parametra geometrije kolosijeka duž analitičke dionice, N predstavlja ukupan broj izmjerenih vrijednosti promatranog parametra geometrije kolosijeka, a N_p predstavlja broj izmjerenih vrijednosti promatranog parametra geometrije kolosijeka koje premašuju određenu toleranciju. Zbog toga je taj sintetizirani pokazatelj kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka u ovom istraživanju odabran kao mjerodavan pokazatelj za analizu utjecaja degradacije geometrije kolosijeka na učinke tramvajskog prometnog sustava.

4 Utjecaj degradacije geometrije kolosijeka na učinke tramvajskog prometnog sustava grada Osijeka

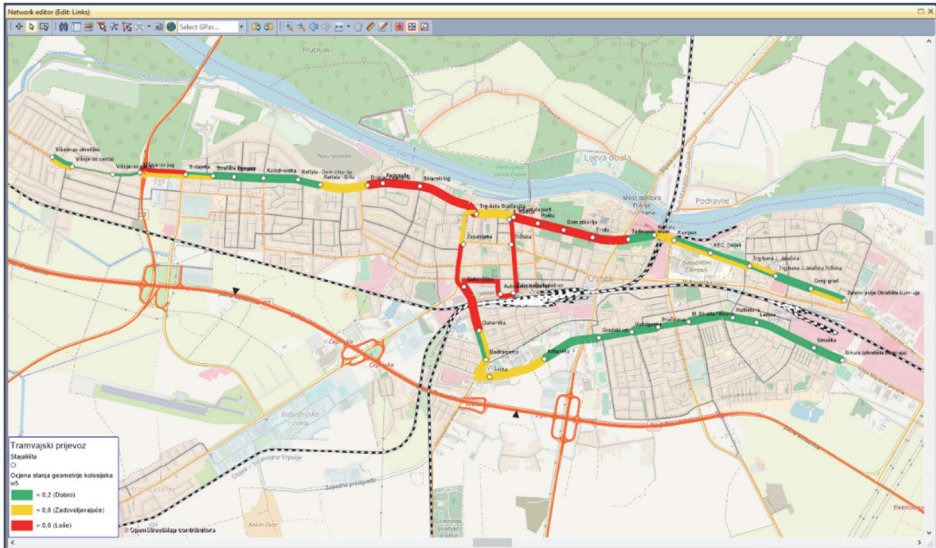
Tramvajsku mrežu na području grada Osijeka čini 30-ak kilometara tramvajskog uskog kolosijeka širine 1.000 mm. Duljina operativnog dijela tramvajskog kolosijeka (kolosijeci izvan tramvajskog spremišta) iznosi 27,5 km. Izmjena putnika odvija se na 44 stajališta međusobno udaljenih od 150 do 700 metara. Tramvajski prijevoz putnika organiziran je dvjema tramvajskim linijama, linijom 1 Zeleno polje – Višnjevac koja povezuje istočna i zapadna naselja sa središtem grada te kružnom linijom 2 Trg A. Starčevića – Bikara – Trg A. Starčevića koja povezuje južna naselja sa središtem grada.



Slika 1. Shematski prikaz tramvajskih pruga na području Grada Osijeka

4.1 Ocjena kvalitete geometrije kolosijeka

Ocjena kvalitete geometrije kolosijeka iskazana je s obzirom na vrijednosti sintetiziranog pokazatelja kvalitete geometrije kolosijeka W_5 . Na temelju izmjerenih i analiziranih podataka o parametrima geometrije kolosijeka [20], ustanovljeno je da na 26 dionica odnosno 9,1 km tramvajskog kolosijeka (34,6 %) potrebna hitna rekonstrukcija kolosijeka radi osiguranja ispravne kolosiječne geometrije. Zadovoljavajuća kvaliteta tramvajskog kolosijeka je na 22 dionice odnosno na 5,8 km. Na preostalih 30 dionica tramvajskog kolosijeka duljine 11,4 km kvaliteta kolosijeka ocijenjena je kao dobra. Na slici 2. prikazana je ocjena kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka po dionicama između stajališta.



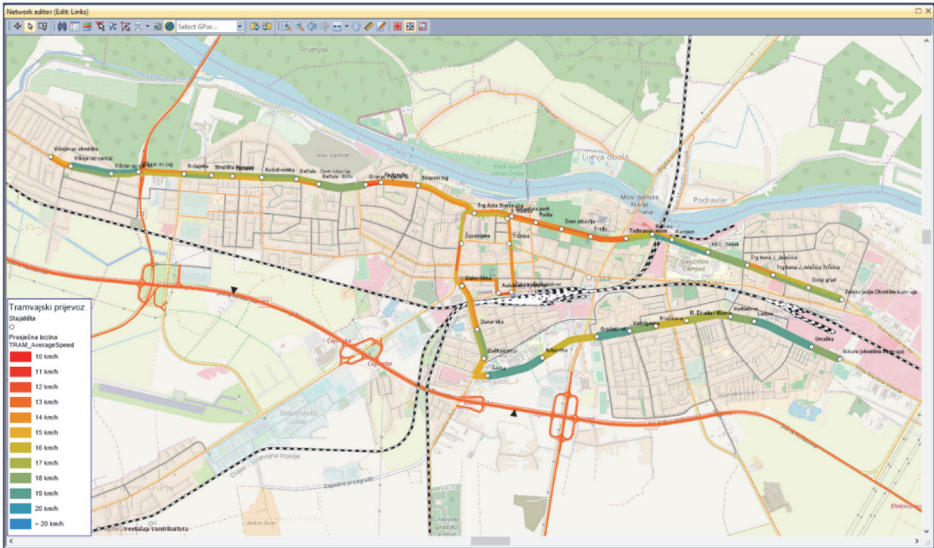
Slika 2. Ocjena kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka

4.2 Utjecaj kvalitete geometrije na učinke sustava

Izračun učinaka tramvajskog prometnog sustava proveden je pomoću multimodalnog 4-stupanjskog prometnog modela ponude i potražnje za šire područje grada Osijeka. Primjenom izrađenog modela, operativni pokazatelj „prosječna brzina tramvajskog vozila“ na dionicama između stajališta izračunan je iz omjera dviju mjerljivih varijabli, prijedženog puta i ukupnog vremena putovanja vozila na dionici (uzimajući u obzir i vrijeme stajanja vozila bez obzira na razlog) temeljenog na aktualnom voznom redu. Prikaz prosječnih brzina tramvajskog vozila po dionicama tramvajske mreže na karakterističan radni dan prikazan je na slici 3.

Analizom parametra kvalitete geometrije tramvajskog kolosijeka i operativnog pokazatelja brzine putovanja tramvajskog vozila ustanovljeno je da kvaliteta geometrije kolosijeka utječe na prosječnu brzinu putovanja tramvajskog vozila gdje je na dionicama s dobrim stanjem geometrije kolosijeka prosječna brzina u rasponu od 14 do 19 km/h, dok je na dionicama s lošim stanjem geometrije kolosijeka prosječna brzina kreće u rasponu od 11 do 14 km/h.

Putnički model potražnje izrađen je kao sintetički model EVA metodom. Prometni pokazatelj „broj putnika“ predstavlja sumu svih putovanja tramvajskim prometnim sustavom u promatranom vremenskom razdoblju. Na temelju izračuna broja putnika po dionicama tramvajskih linija ustanovljeno je kako broj putnika u tramvajskom sustavu raste od rubnih područja prema središtu grada te da ne ovisi o prosječnoj brzini tramvajskog vozila.



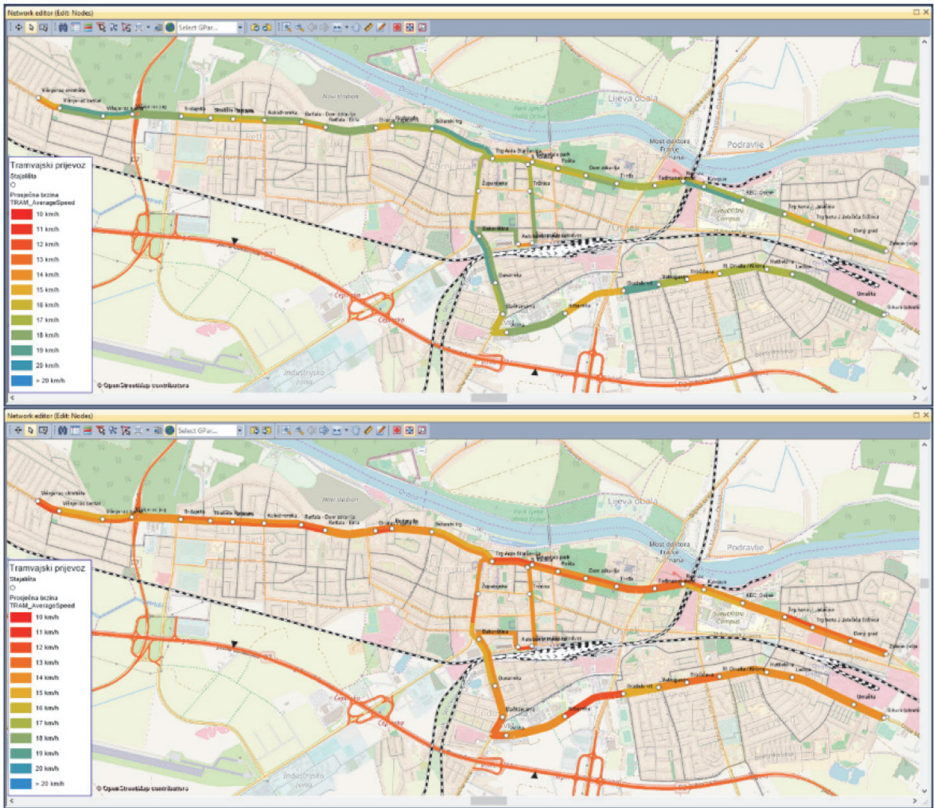
Slika 3. Prosječna brzina tramvajskog vozila po dionicama

4.3 Utjecaj degradacije geometrije na učinke sustava

Degradacija geometrije kolosijeka u izravnoj je ovisnosti o građevinskim karakteristikama i kumulativnom statičkom opterećenju konstrukcije [21]. Testiranje utjecaja degradacije kolosijeka na učinke tramvajskog prometnog sustava provedeno je kroz dva prognozna scenarija ponude javnog prijevoza, odnosno za dva granična stanja geometrije tramvajskog kolosijeka:

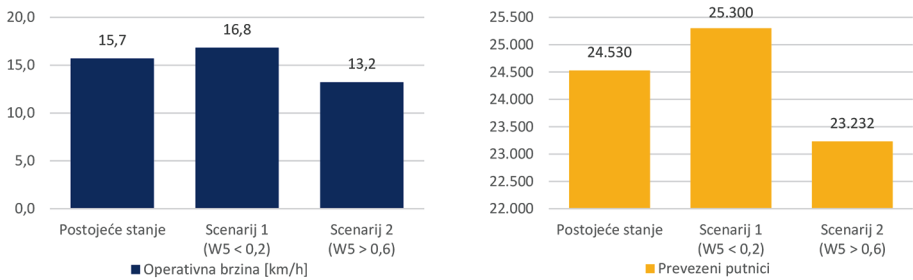
- scenarij 1 – dobro stanje geometrije kolosijeka gdje je $W_5 \leq 0,2$ i
- scenarij 2 – loše stanje geometrije kolosijeka gdje je $W_5 > 0,6$.

Kvaliteta geometrije tramvajskog kolosijeka u oba scenarija modelirana je novim voznim redovima izračunanim na temelju podataka o prostornom rasteru stajališta, ograničenjima najveće dopuštene brzine tramvaja ovisno o stanju geometrije kolosijeka na dionici, karakteristikama tramvajskog vozila te vremenu izmjene putnika na stajalištu. Operativni učinak prosječne brzine tramvajskog vozila na dionicama mreže u oba scenarija prikazan je na slici 4.



Slika 4. Prosječna brzina tramvajskog vozila po dionicama u scenariju 1 (gore) i scenariju 2 (dolje)

Za oba prognozna scenarija izračun prometne potražnje te dodjele putovanja na mrežu temelji se na novoj prometnoj ponudi tramvajskog prometnog sustava. Izračunani prometni i operativni pokazatelji (slika 5.) pokazuju da degradacija geometrije tramvajskog kolosijeka utječe na promjenu prometne potražnje. U odnosu na postojeće stanje tramvajskog prometnog sustava, u scenariju 1, koji predviđa dobro stanje geometrije tramvajskog kolosijeka, prosječna operativna brzina tramvajskog vozila se povećala kao i broj prevezenih putnika. U scenariju 2, koji predviđa loše stanje geometrije kolosijeka, u odnosu na postojeće stanje prosječna operativna brzina tramvajskog vozila se smanjila kao i broj prevezenih putnika.



Slika 5. Usporedba prometnog i operativnog pokazatelja tramvajskog sustava

5 Zaključak

Ključan podatak na temelju kojeg se određuje vozni red linije gradske željeznice jest brzina putovanja. Postoje razni modeli predviđanja brzine putovanja koji se uglavnom oslanjaju na različite statističke modele ili tehnike strojnog učenja. Zajedničko velikoj većini modela je to da predviđanje brzine putovanja temelje na samo jednom utjecajnom parametru. Mali broj modela za izračune brzine putovanja koristi veći broj pretpostavki, pojednostavljenja i ograničenja, gdje su različiti parametri koji utječu na kretanje tramvajskog vozila uglavnom sažeti i/ili zanemareni s obzirom na dostupnost podataka kao i na metode i uređaje koji su korišteni za prikupljanje podataka na terenu.

Pregledom literature ustanovljeno je da postoji potreba za unaprjeđenjem procesa modeliranja brzine putovanja javnim prijevozom kroz dopunu znanja o dinamičkim utjecajnim čimbenicima i otporima kretanju tramvaja. Na primjeru analize tramvajskog sustava grada Osijeka utvrđeno je da postoji korelacija između degradacije geometrije kolosijeka i prosječne brzine vožnje tramvajskog vozila. Konačno, budući da je izračun prometne potražnje u izravnoj ovisnosti o prometnoj ponudi tramvajskog prometnog sustava, može se zaključiti da degradacija geometrije kolosijeka izravno utječe na učinke tramvajskog prometnog sustava.

Literatura

- [1] Altinkaya M., Zontul M., Urban Bus Arrival Time Prediction: A Review of Computational Models, International Journal of Recent Technology and Engineering (Volume-2, Issue-4), 2013.
- [2] Wang B. et al., Segmented Signal Progression Model for the Modern Streetcar System, Discrete Dynamics in Nature and Society, Volume 2015, Article ID 763565, 10 pages, DOI:<http://dx.doi.org/10.1155/2015/763565>, 2015.

- [3] Amirnazmifshar E., Tramway dwell time estimation and analysis by using multiple linear regression method, *European Journal of Engineering Science and Technology*, 2(1), pp. 36-48, DOI: <http://doi.org/10.33422/EJEST.2019.01.49>, 2019.
- [4] Csiszar C., Sándor Z., Method for analysis and prediction of dwell times at stops in local bus transportation, *Transport* 32(3):302-313, 2017.
- [5] Christoforou Z., Chandakas E., Kaparias I., An investigation of dwell time patterns in urban public transport systems: The case of the Nantes tramway, *Transportation by 2030: Trends and Perspectives*, 8th International Congress on Transportation Research' (ICTR 2017), Thessaloniki, Greece, Sept. 28-29, 14p, <https://eprints.soton.ac.uk/414364/>, 2017.
- [6] Lin T.M., Wilson N.H.M.. Dwell time relationships for light rail systems, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* 1361(1361):287-295, 1991.
- [7] Rüger B., Eigner T., Platform infrastructure – influence on passenger behaviour, 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2018, <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2018.684>, 2018.
- [8] Lückcrath D., Ullrich O., Speckenmeyer E., Modelling Timetable based Tram Traffic, *SNE - Simulation Notes Europe (Volume 22, Number 2)*, pp. 61-68, DOI: 10.11128/sne.22.tn.1012, 2012.
- [9] Zychowski A., Junosza-Szaniawski K., Kosicki A., Travel time prediction for trams in Warsaw, Zychowski A., Kurzynski M., Wozniak M., Burduk R. (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Recognition Systems CORES 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 578. Springer, Cham, pp. 53-62, DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-59162-9_6, 2017.
- [10] Lai D.S.W., Leung J., Real-time rescheduling and disruption management for public transit, *Transportmetrica B: Transport Dynamics* (6:1 17-33), 2017.
- [11] Ahac M. Mehaničko-empirijski model promjene širine tramvajskog kolosijeka tijekom eksploatacije, *Disertacija*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, 2013.
- [12] Liu R. et al., Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro, *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2015:1-9, 2015.
- [13] Setiawan D.M., Rosyidi S.A.P., Track Quality Index as Track Quality Assessment Indicator, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board DOI: 10.3141/2146-14, 2016.
- [14] Elkhoury N., Analysis and Prediction of Tram Track Degradation, *Masters by Research, Engineering*, RMIT University, 2018.

- [15] Madejski, J., Light rail, tram track and turnout geometry measurement and diagnostic tools, in Brebbia, C.A., Wadhwa, L., ed. Urban Transport XI: Urban Transport and the Environment in the 21st Century, WIT Transactions on The Built Environment, 77, pp. 185-195, 2005.
- [16] EN 13848-1: Railway applications / Track – Track geometry quality, Part 1: Characterisation of track geometry
- [17] Krug G.A., Madejski J., Improving track condition by application of quasi cumulative distribution function, 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2018, <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2018.749>, 2018.
- [18] Madejski J., Holistic approach to track condition data collection and analysis, 4th International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2016, <https://master.grad.hr/cetra/ocs/index.php/cetra4/cetra2016/paper/view/550>, 2016.
- [19] Bulletin of the Polish State Railways, Annex to the Order No. 86 of the Polish State Railways (PKO) Headquarters of 14 November 1996: D 75 – Instruction on taking Measurements, Examinations and Assessment of Track Condition
- [20] Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na mreži GPP-a Osijek, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2016.
- [21] Ahac M., Lakušić S., Madejski J., Haladin I., Application of Osijek's tram tracks geometry analysis results in their reconstruction strategy development, 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure-CETRA 2018, DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2018.902>, 2018.