

Uticaj uzdužnog nagiba tunela na kretanje vozila i upravljanje sporim vozilima²⁷

Ivana Andrijanić, "Putevi Srbije" d.o.o. ivana.andrijanic@putevi-srbije.rs

Ivana Kuljanin, "Putevi Srbije" d.o.o. ivana.kuljanin@putevi-srbije.rs

Ivana Ilić, "Putevi Srbije" d.o.o. ivana.ilic@putevi-srbije.rs

Katarina Komnenović, "Putevi Srbije" d.o.o. katarina.komnenovic@putevi-srbije.rs

Rezime: Uzdužni nagib u tunelima predstavlja značajan faktor koji utiče na kinematičko ponašanje vozila i bezbednost saobraćaja. Veći nagibi dovode do usporavanja teških teretnih vozila, autobusa i drugih vozila sa slabijim ubrzanjem, što povećava brzinske razlike, rizik od nestabilnosti kretanja i verovatnoću zastoja i nezgoda. Rad analizira uticaj različitih vrednosti nagiba na promenu brzine vozila i mera za upravljanje saobraćajnim tokovima. Poseban akcenat dat je detekciji i upravljanju sporim vozilima, koja na nagibima predstavljaju kritičan element. Savremeni tuneli koriste video-nadzor, radarske i LIDAR senzore za rano prepoznavanje sporih vozila pre i tokom ulaska u tunel. Nakon detekcije, sistemi upravljanja saobraćajem aktiviraju dinamičku signalizaciju, prilagođavaju ograničenja brzine i, po potrebi, privremeno regulišu ulazak vozila radi formiranja bezbednog razmaka. Na osnovu rezultata predložene su mere za unapređenje bezbednosti i protočnosti, među kojima se ističu: obavezno kretanje teških i sporih vozila voznom trakom i njihovo usmeravanje u posebnu traku kako bi se smanjile brzinske razlike i povećala stabilnost saobraćajnog toka. Preporučene mere doprinose standardizaciji režima kretanja i bezbednijem odvijanju saobraćaja u tunelima sa izraženim uzdužnim nagibom.

Ključne reči: uzdužni nagib, tuneli, brzina vozila, spora vozila, teška teretna vozila, detekcija, upravljanje

1 UVOD

Protok saobraćaja na mreži autoputeva Republike Srbije kontinuirano raste, uz sve veće učešće teretnih vozila i složenije zahteve u pogledu upravljanja saobraćajnim tokovima. Poseban izazov predstavljaju tuneli i deonice sa izraženim uzdužnim nagibima, gde i manji poremećaji u saobraćajnom toku mogu značajno uticati na bezbednost i protočnost.

Tuneli predstavljaju posebno osetljive elemente putne infrastrukture, jer su mogućnosti reagovanja i oporavka saobraćajnog toka ograničene. Pojava sporih ili zaustavljenih vozila može dovesti do formiranja kolona, povećanja razlika u brzinama i nastanka dodatnih bezbednosnih rizika. Pod događajem „Sporo vozilo“ se podrazumeva detekcija vozila koje se kreće brzinom manjom od 40 km/h. Zaustavljeno vozilo detektuje se video-analitikom kada vozilo miruje 3–5 sekundi u detekcijskom polju kamere. [1] [2]

²⁷ CC BY-NC-ND licenca

Analiza podataka sa deonice državnog puta IA reda broj 2 pokazala je da događaji tipa „Sporo vozilo“ predstavljaju jedan od najzastupljenijih tipova detektovanih incidenata, odnosno poremećaja saobraćajnog toka u tunelima Munjino Brdo i Laz. Cilj rada je analiza karakteristika saobraćajnog toka i registrovanih događaja, sa posebnim osvrtom na uticaj intenziteta i strukture saobraćaja, brzina i geometrijskih karakteristika trase. [5]

Na osnovu rezultata analize razmatraju se mogućnosti unapređenja sistema za ranu detekciju i upravljanje incidentnim situacijama, sa ciljem povećanja bezbednosti, smanjenja rizika od sekundarnih događaja i očuvanja protočnosti saobraćaja u tunnelskim uslovima na ostalim tunelima, na mreži državnih puteva IA reda, na kojima sistemi nisu implementirani.

2 ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja je deonica državnog puta IA reda broj 2, na sektoru petlja Pakovrač–petlja Prilipac, sa tunelima Munjino Brdo i Laz. Oba objekta su projektovana kao dvocevni tuneli sa odvojenim smerovima saobraćaja i ograničenjem brzine od 80 km/h. Tunel Munjino Brdo obuhvata cevi dužine 2.740 m (smer ka Požegi) i 2.756 m (smer ka Beogradu), dok tunel Laz čine cevi dužine 2.670 m (smer ka Požegi) i 2.845 m (smer ka Beogradu). Širina kolovoza u tunelima je 7.70 m. Visina saobraćajnog profila je $H=4.75$ m. Sa obe strane kolovoza u oba tunela su projektovane službene pešačke staze širine od 1.19–1.28 m i one su uzdignute iznad kolovoza za $\Delta h = 7$ cm. Ispod njih je predviđen prostor za smeštaj različitih elektroenergetskih i telekomunikacionih instalacija. [3] [4]

Podužni pad tunela Munjino Brdo je max 2.5%, dok je poprečni pad tunela max 3.5%. Niveleta leve tunelske cevi (smer ka Beogradu) je u usponu od 2.5% od ulaznog portala do dužine od 2025.48 m, a zatim je u padu od 1.0% prema izlaznom portalu (na dužini od 730.27 m). Niveleta desne tunelske cevi (smer ka Požegi) je u usponu od 2.5% od ulaznog portala do dužine od 2020.48 m, a zatim je u padu od 1.0% prema izlaznom portalu (na dužini od 719.66 m). [3] [4]

Niveleta leve tunelske cevi tunela Laz (smer ka Beogradu) je u vertikalnoj konveksnoj krivini, radijusa $R_v=8000.00$ m, sa prelomom na izlazu iz tunelske cevi. Niveleta kolovoza je u padu od 3.0% ka ulaznom portalu. Niveleta desne tunelske cevi (smer ka Požegi) je u vertikalnoj konveksnoj krivini, radijusa $R_v=8000.00$ m, sa prelomom na izlazu tunelske cevi. Niveleta kolovoza je u padu od 3.0% ka ulaznom portalu. [3] [4]

Praćenje saobraćajnih tokova vrši se automatskim brojačima saobraćaja, dok su tuneli opremljeni sistemima video-nadzora i automatske detekcije incidenata (AID), promenljivom saobraćajnom signalizacijom (VMS), ventilacijom i senzorima za praćenje koncentracije CO i NOx. Raspoloživi podaci omogućavaju analizu saobraćajnih tokova i pojave događaja „Sporo vozilo“ i „Zaustavljeno vozilo“. [5]

Tabela 1: Broj sporih/zaustavljenih vozila prema periodu dana i smeru kretanja

Tunel	Smer	06h–22h	22h–06h	Ukupan broj sporih/zaustavljenih vozila
Tunel Laz	Ka Požegi	589	66	655
Tunel Laz	Ka Beogradu	26	10	36
Tunel Munjino Brdo	Ka Požegi	247	55	302
Tunel Munjino Brdo	Ka Beogradu	71	11	82

Tabela 2: Osnovni saobraćajni pokazatelji u tunelima Laz i Munjino Brdo

Parametar	1438 Tunel Laz (CA - PO)	1439 Tunel Laz (PO - CA)	1440 Tunel M. Brdo (CA-PO)	1441 Tunel M. Brdo (PO- CA)
Broj događaja „Sporo vozilo“/„Zaustavljeno vozilo“	655	36	302	82
PGDS	5011	5293	5327	4643
Udeo teretnih vozila (%)	4.61%	6.44%	7.13%	6.94%
Srednja brzina (km/h) (Ograničenje brzine (km/h))	97 (80)	102 (80)	82 (80)	92 (80)
Maksimalni satni protok	14/02/2026	24/08/2025	03/05/2026	31/08/2025

2.1 Analiza saobraćajnih tokova i događaja „Sporo vozilo“ / „Zaustavljeno vozilo“

Analiza je izvršena u odnosu na PGDS, udeo teretnih vozila, srednju brzinu, ograničenje brzine i vremensku raspodelu događaja.

Tabela 3: PGDS i struktura saobraćajnog toka u tunelima Laz i Munjino Brdo

Tunel / smer	PA	BUS	LT	ST	TT	AV	UKUPNO
1438 – Tunel Laz (CA–PO)	4751	30	78	41	24	88	5011
1439 – Tunel Laz (PO–CA)	4913	39	94	63	37	147	5293
1440 – Tunel M. Brdo (CA–PO)	4909	37	100	61	44	175	5327
1441 – Tunel M. Brdo (PO–CA)	4289	33	94	58	37	133	4643

Tabela 4: Podaci iz baze događaja

Tunel	Smer	Sporna/Zaustavljena vozila 06–22	Sporna/Zaustavljena vozila 06–22	Ukupno	PGDS	Udeo TV	Srednja brzina
Laz	Ka Požegi	589	66	655	5.011	4.61 %	97 km/h
Laz	Ka Beogradu	26	10	36	5.293	6.44 %	102 km/h
Munjino Brdo	Ka Požegi	247	55	302	5.327	7.13 %	82 km/h
Munjino Brdo	Ka Beogradu	71	11	82	4.643	6.94 %	92 km/h

Najveći broj događaja registrovan je tokom dnevnog perioda (06:00–22:00 h). U tunelu Laz evidentirano je 655 događaja u smeru ka Požegi i 36 u smeru ka Beogradu, dok je u tunelu Munjino Brdo registrovano 302, odnosno 82 događaja.

Rezultati pokazuju da učestalost događaja nije direktno proporcionalna intenzitetu saobraćaja. Iako su PGDS vrednosti po smerovima međusobno slične, broj događaja značajno varira. Sličan zaključak proizlazi i iz analize udela teretnih vozila, koji samostalno ne objašnjava razlike u učestalosti događaja.

Analiza srednjih brzina pokazuje vrednosti od 82 do 102 km/h, pri čemu je ograničenje brzine 80 km/h. Najveći broj događaja registrovan je u smerovima ka Požegi, posebno u tunelu Munjino Brdo, gde srednja brzina iznosi 82 km/h. To ukazuje na značaj karakteristika smera, uzdužnog profila i geometrije trase za pojavu sporih i zaustavljenih vozila. U oba analizirana tunela smerovi ka Požegi izdvajaju se kao kritičniji, sa značajno većim brojem registrovanih sporih vozila u odnosu na smerove ka Beogradu.

Pojava sporih vozila dovodi do povećanja razlika u brzinama između učesnika u saobraćaju, formiranja kolona i povećanja rizika od konfliktnih situacija i sekundarnih saobraćajnih nezgoda. Kako se geometrijski elementi trase, uključujući uzdužne nagibe, ne mogu menjati u fazi eksploatacije, unapređenje bezbednosti potrebno je zasnivati na pravovremenoj detekciji incidenata, promenljivoj saobraćajnoj signalizaciji i efikasnom operativnom upravljanju saobraćajem.

Dobijeni rezultati potvrđuju značaj primene inteligentnih transportnih sistema (ITS) u tunelima, posebno za rano prepoznavanje sporih i zaustavljenih vozila i pravovremeno reagovanje u cilju smanjenja rizika i očuvanja protočnosti saobraćaja.

2.2 Identifikacija kritičnih situacija

U tunelima Laz i Munjino Brdo, između ostalih, implementirani su sistem automatske detekcije saobraćajnih incidenata i sistem kontrole kvaliteta vazduha.

Sporo vozilo detektuje se video-analitikom pri brzini manjoj od 40 km/h, nakon čega se, u zavisnosti od situacije, putem Centralnog sistema za nadzor i upravljanje aktivira odgovarajući saobraćajni scenario upravljanja i smanjuje dozvoljena brzina na 40 ili 60 km/h. Posledice mogu biti formiranje kolone, smanjenje brzine i povećanje emisije NOx. [1] [2]

Zaustavljeno vozilo detektuje se kada vozilo miruje 3–5 sekundi u detekcijskom polju kamere. Nakon validacije alarma, sistem smanjuje dozvoljenu brzinu na 60 km/h, odnosno zatvara tunel u slučaju blokade izlaza. Posledice su povećan rizik od naletanja, zatvaranje saobraćajne trake i usporavanje saobraćaja. [1] [2]

Povećana koncentracija NOx prati se pomoću senzora za kontrolu kvaliteta vazduha i vidljivosti, pri čemu se ventilacioni sistem automatski aktivira na definisanim pragovima vrednosti NOx od 7,5; 37,5 i 50 ppm. Učestalo aktiviranje ventilacije može uticati na pouzdanost rada sistema, posebno tokom dvosmernog režima saobraćaja. [1] [2]

2.3 Analiza rada implementiranih ITS sistema

Sporo, odnosno zaustavljeno vozilo u tunelima Laz i Munjino Brdo detektuje sistem automatske detekcije incidenata (AID). Nakon detekcije, na Centralnom sistemu za nadzor i upravljanje saobraćajem (CSNU) generiše se alarm, koji dalje podleže proveru i validaciji od strane operatera u Tunelskom operativnom centru. S obzirom na to da sistem automatske detekcije incidenata generiše približno 5% lažnih alarma, neophodna je provera njihove pouzdanosti uvidom u sistem video-nadzora ili proverom podataka dobijenih sa brojača saobraćaja, kao što su brzina i kategorija vozila. Nakon potvrde pouzdanosti alarma, operater, u zavisnosti od tipa vanrednog događaja, aktivira

odgovarajući predefinisani algoritam upravljanja saobraćajem. Aktiviranjem algoritma, putem promenljive saobraćajne signalizacije vrši se izmena režima saobraćaja u tunelu i njegovoj uticajnoj zoni, uz adekvatno ograničenje brzine i blagovremeno upozoravanje i informisanje učesnika u saobraćaju. [1] [2]

Primena implementiranih inteligentnih transportnih sistema u tunelima Laz i Munjino Brdo pokazala se od velikog značaja, jer posledice kao što su sekundarne saobraćajne nezgode nisu zabeležene, dok je pojava formiranja kolone vozila svedena na minimum. Takođe je značajno istaći veoma visoku pouzdanost Centralnog sistema za nadzor i upravljanje saobraćajem, kao i samog sistema za automatsku detekciju incidenata, s obzirom da je pojava lažnih alarma beležena samo u prvim mesecima eksploatacije, dok se sistem prilagođavao na okruženje i dok su vršena dodatna podešavanja.

3 ZAKLJUČAK

Analiza događaja „Sporo vozilo“ i „Zaustavljeno vozilo“ pokazala je značaj primene integrisanih ITS sistema za nadzor i upravljanje saobraćajem u tunelima Laz i Munjino Brdo. Primenjene mere za unapređenje bezbednosti su sistem ranog upozorenja za spora i zaustavljena vozila, dinamička signalizacija sa odgovarajućim upozorenjima, automatsko upravljanje sistemom ventilacije i integracija podataka sa kamera, brojača saobraćaja i senzora za detekciju NOx. Primena ovih sistema omogućava pravovremeno informisanje vozača, smanjenje brzinskih razlika i efikasnije upravljanje incidentnim situacijama. Zbog svoje visoke pouzdanosti, posebno se značajnim pokazao sistem ranog upozorenja zasnovan na video-detekciji, automatskoj obradi slike, koji omogućava pravovremenu automatsku detekciju sporih ili zaustavljenih vozila i adekvatnu i efikasnu reakciju operatera iz upravljačkog centra aktiviranjem promenljive saobraćajne signalizacije (VMS).

S obzirom na specifične građevinske i saobraćajne karakteristike tunela Laz i Munjino Brdo, pre svega velike dužine i izražene uzdužne nagibe, primena navedenih sistema predstavlja posebno značajnu meru za povećanje bezbednosti i pouzdanosti odvijanja saobraćaja. Dobijeni rezultati ukazuju na opravdanost primene istog koncepta i na drugim tunelima na mreži državnih puteva Republike Srbije, posebno na tunelima sa izraženim uzdužnim nagibima, kao što su Šarani, Bancarevo, Manajle, Železnik, Straževica i Predejane.

Dalji razvoj sistema treba usmeriti ka njihovoj međusobnoj integraciji i formiranju jedinstvenog sistema za rano prepoznavanje incidenata, automatsko reagovanje i operativno upravljanje incidentnim situacijama, čime bi se dodatno unapredili bezbednost saobraćaja i efikasnost upravljanja tunelima.

LITERATURA

- [1] KBV DATACOM d.o.o. jul 2025. 8/2.1 PZI – Kontrolno operativni planovi – tunel Munjino Brdo. Beograd.
- [2] KBV DATACOM d.o.o. jul 2025. 8/2.1 PZI – Kontrolno operativni planovi – tunel Laz. Beograd.
- [3] Saobraćajni institut CIP d.o.o. 2020. 2/1.3 PZI – Projekat tunela Laz. Beograd.
- [4] Saobraćajni institut CIP d.o.o. 2020. 2/1.3 PZI – Projekat tunela Munjino Brdo. Beograd.
- [5] Putevi Srbije d.o.o. Odeljenje za nadzor i upravljanje saobraćajem – FM.850.420.005. (2025) Dnevnik događaja Munjino Brdo i Laz.

The Impact of Tunnel Longitudinal Gradient on Vehicle Movement and Slow-Vehicle Management

Abstract: The longitudinal gradient in tunnels represents a significant factor affecting the kinematic behaviour of vehicles and traffic safety. Steeper gradients lead to speed reductions of heavy goods vehicles, buses, and other vehicles with lower acceleration capabilities, thereby increasing speed differentials, the risk of unstable vehicle movement, and the likelihood of congestion and traffic accidents. This paper analyses the influence of different gradient values on changes in vehicle speed and measures for traffic flow management. Particular emphasis is placed on the detection and management of slow-moving vehicles, which represent a critical element on steep gradients. Modern tunnels use video surveillance, radar, and LiDAR sensors for the early detection of slow-moving vehicles before and during tunnel entry. Following detection, traffic management systems activate dynamic traffic signs, adjust speed limits, and, where necessary, temporarily regulate vehicle entry in order to maintain safe spacing between vehicles. Based on the results, measures are proposed to improve traffic safety and traffic flow efficiency, including mandatory use of the driving lane by heavy and slow-moving vehicles and their routing to a dedicated lane in order to reduce speed differentials and improve the stability of the traffic flow. The proposed measures contribute to the standardisation of traffic operating regimes and to safer traffic conditions in tunnels with pronounced longitudinal gradients.

Keywords: longitudinal gradient, tunnels, vehicle speed, slow-moving vehicles, heavy goods vehicles, detection, traffic management