

asist. Luka Trček, mag. inž. grad.
luka.trcek@fgg.uni-lj.si



doc. dr. Peter Lipar, dipl. inž. grad.
peter.lipar@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK/UDC: 625.76:656.11.021.24(078.9)

PREPUSTNOST AVTOCESTNIH ODSEKOV PRI RAZLIČNIH TIPIH DELOVNIH ZAPOR

CAPACITY FOR DIFFERENT TYPES OF MOTORWAY WORK ZONES

Povzetek

Zaradi staranja avtocestnega omrežja bomo v prihodnosti pričali vse bolj obsežnim vzdrževalnim delom in pogostejšim avtocestnim zaporom. Delovna zapora predstavlja ozko grlo in zato poslabša nivo usluge avtocestnega odseka. V študiji smo obravnavali različne metode za ocenjevanje prepustnosti avtocestnih odsekov pri delovnih zaporah. Pridobili smo podatke o prometnih obremenitvah, podatke o lokacijah avtomatskih števnih mest in podatke o različnih delovnih zaporah, ki so se izvajale na našem avtocestnem omrežju. Na podlagi pridobljenih podatkov smo z regresijsko analizo ocenili pretoke v času zastoja, z metodo največjega verjetja pa določili porazdelitvene funkcije prepustnosti avtocestnih odsekov pri posameznih tipih zapor. Ugotavljali smo, kako na prepustnost avtocestnega odseka pri zaporu vplivajo prisotnost tovornih vozil, vzdolžni naklon ceste, različne izvedbe zožitve in preusmeritev prometa na sosednje prometne pasove. Na tak način smo upoštevali tudi vpliv začasnih prometnih pasov (zožitve in preusmeritve prometa) na prepustnost avtocestnega odseka pri delovni zaporu, ki jih obstoječa metodologija HCM 6 v modelu za izračun prepustnosti ne zajema.

Ključne besede: avtocestna zapora, porazdelitvena funkcija prepustnosti, verjetnost pojava zastoja, pretok v času zastoja

Summary

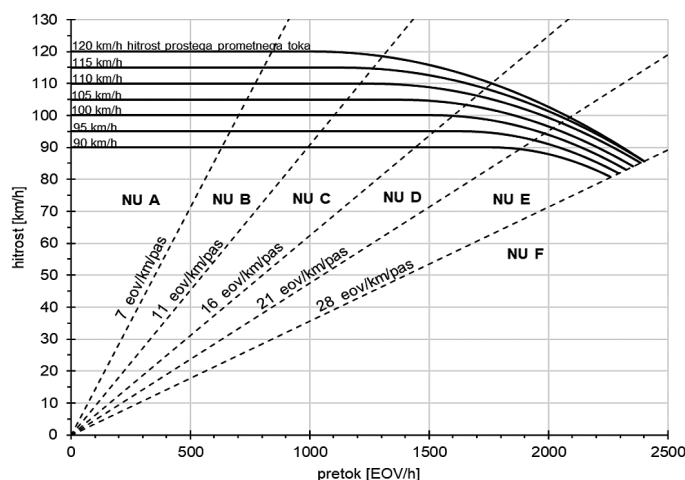
As Slovenian motorway infrastructure is aging, maintenance work, managed with appropriate work zones, which is already extensive, will be an even a bigger necessity in the future. Work zones can have a significant impact on the traffic flow as they represent a bottleneck that causes motorways to operate at lower levels of capacity. This article considers various methods found in the literature for determining the capacity of motorway work zones. We collected data on traffic volumes, data on the locations of traffic counters, and data on work zones implemented in a certain time period on the Slovenian motorway network. The collected data form the basis for regression analysis of queue discharge rates and determination of cumulative capacity distribution functions using the maximum likelihood method. We studied the effect of heavy vehicles, longitudinal grade, lane narrowing and traffic detour on the work zone capacity. In this way we accounted for the temporary traffic lane configuration during work zones (lane narrowing and diversion of traffic), which is not included in the model for the determination of work zone capacity in HCM 6.

Key words: motorway work zone, cumulative distribution function, probability of breakdown, queue discharge rate

1 UVOD

V prispevku obravnavamo različne tipe avtocestnih zapor in njihov vpliv na dogajanje v prometnem toku na avtocesti. Cestno omrežje se stara, zato bomo v prihodnosti priča vse večjemu obsegu vzdrževalnih del na avtocestah in hitrih cestah. Prometne razmere na cestah pogosto vplivajo na dostopnost in posredno na kakovost življenja prebivalcev. Za zagotavljanje ustrezne prometne varnosti in ustrezne kakovosti storitev, ki jih ponujajo avtoceste in hitre ceste, je pomembno poznati vpliv delovnih zapor na prometni tok.

Metodologija HCM, ki jo priznava tudi zakonodaja v Republiki Sloveniji, kakovost storitve določenega avtocestnega odseka ocenjuje iz perspektive voznika. Ta je določena z nivojem interakcije med vozili in z vplivom drugih vozil na voznika. V neprekinjenem prometnem toku, ki je značilen za avtoceste in hitre ceste, sta nivo interakcije med vozili in s tem svoboda manevriranja posameznega vozila odvisna od razmakov med vozili. Z razmaki med vozili je določena gostota prometnega toka, ki je v metodologiji HCM ključna spremenljivka za opisovanje nivojev uslug avtocestnega odseka ob določenem prometnem povpraševanju.



Slika 1. Nivoji uslug na diagramih hitrost–pretok na avtocestnih odsekih, povzeto po HCM 6 [Transportation Research Board, 2016a] in pretvorjeno v metrični sistem.

V prispevku povzemamo rezultate raziskav in opisujemo metodologijo, ki smo jo uporabili za oceno prepustnosti avtocestnih odsekov pri različnih tipih zapor. V pogojih neprekinjenega prometnega toka je ocena prepustnosti namreč bistvena za določitev nivojev uslug pod različnimi scenariji prometnega povpraševanja.

1.1 Prepustnost kot slučajna spremenljivka

Stohastičen pristop prepustnost obravnava kot slučajno spremenljivko. V tem smislu prepustnost razumemo kot največji pretok, pri katerem je prometni tok še stabilen. V primeru, da prometno povpraševanje preseže vrednost prepustnosti, pride do pojava zastoja. Izmerjene vrednosti najvišjega pretoka, tik preden se pojavi zastoj, se običajno med seboj zelo razlikujejo tudi v primeru različnih meritev na istem odseku. To potrjuje,

da je zastoj naključen pojav, ki je odvisen od obnašanja več voznikov in od specifičnih razmer na cesti [Brilon, 2007].

Metodologijo za oceno porazdelitvene funkcije prepustnosti, ki temelji na statistični analizi preživetja, je implementiral Brilon [Brilon, 2005] in jo za oceno prepustnosti na podlagi pridobljenih števnih podatkov predlaga tudi HCM 6 v poglavju 26. Cilj je določiti porazdelitveno funkcijo prepustnosti:

$$F_c(q) = P(c \leq q), \quad (1)$$

kjer sta $F_c(q)$ porazdelitvena funkcija prepustnosti in $P(c \leq q)$ verjetnost, da je pretok večji ali enak od prepustnosti.

Na podlagi izmerjenih podatkov o prometnih obremenitvah lahko porazdelitveno funkcijo prepustnosti določimo z različnimi metodami, od teh sta se uveljavili dve [Geistefeldt, 2009]: neparametrična metoda z neposredno oceno porazdelitvene funkcije prepustnosti ter parametrična metoda s statističnim modelom porazdelitvene funkcije. Če želimo prepustnost obravnavati kot slučajno spremenljivko, moramo poljubno časovno obdobje i , za katerega imamo podatek o pretoku vozil q_i , obravnavati na enega od naslednjih načinov [Brilon, 2009]:

Tip obdobja C (pojav zastoja): promet v tem časovnem obdobju se odvija tekoče, a pretok, ki se zgodi v tem obdobju, povzroči pojav zastoja, oz. drugače, pretok vozil v tem časovnem obdobju i povzroči, da povprečna hitrost v naslednjem časovnem obdobju $i+1$ pade pod določen prag (v 15-minutnih obdobjih za 25 % kot predlaga HCM). Pretok, ki se zgodi v obdobju i , doseže vrednost prepustnosti.

Tip obdobja T (tekoči promet): promet se tako v obdobju i kot v obdobju $i+1$ odvija tekoče. Prepustnost v časovnem obdobju i je višja od opazovanega pretoka q_i ($q_i < c$).

Tip obdobja Z (zastoj): promet v časovnem obdobju i in v predhodnem časovnem obdobju $i-1$ je zgoščen in poteka v strnjeni koloni s povprečno hitrostjo vozil pod določenim pragom. Ta obdobja ne podajo nobene informacije o prepustnosti, zato jih izločimo iz analize.

Na podlagi raziskav in analiz so raziskovalci [Brilon, 2007] ugotovili, da porazdelitev vrednosti prepustnosti ustrezno opiše Weibullova porazdelitvena funkcija (priporočena tudi po HCM), ki opiše zvezo med pretokom in verjetnostjo pojava zastoja:

$$F_c(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{\beta}\right)^\alpha}, \quad (2)$$

kjer so q pretok vozil [vozil/h], α Weibullovo oblike, β Weibullovo parameter merila.

Parametra α in β iz enačbe (2) ocenimo s statistično metodo največjega verjetja. Pri tem iščemo maksimum funkcije verjetja [Brilon, 2007]:

$$L(\alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n f_c(q_i)^{\delta_i} \cdot [1 - F_c(q_i)]^{1-\delta_i}, \quad (3)$$

oziroma njenega naravnega logaritma:

$$\ln(L) = \sum_{i=1}^n \{\delta_i \cdot \ln[f_c(q_i)] + (1 - \delta_i) \cdot \ln[1 - F_c(q_i)]\}, \quad (4)$$

kjer so $f_c(q_i)$ gostota verjetnosti prepustnosti c , $F_c(q_i)$ porazdelitvena funkcija prepustnosti c , n število izmerjenih obdobj, δ_i binarna spremenljivka obdobja i ($i=0$, če je časovno obdobje i tipa T (tekoči promet) ali $i=1$, če je časovno obdobje i tipa C (pojav zastoja)).

Rezultat analize je porazdelitvena funkcija prepustnosti, ki določa verjetnost pojava zastoja pri določenem pretoku. Metoda je uporabna pri vpeljavi koncepta zanesljivosti in verjetnosti pojava zastoja na posameznih odsekih v določenih prometnih razmerah. Za vrednost prepustnosti določimo tisti pretok, za katerega lahko z določeno verjetnostjo trdimo, da zagotavlja stabilen prometni tok oz. da pri takem pretoku obstaja majhna verjetnost pojava zastoja (npr. 5 % ali 15 %, kot predlaga metodologija HCM).

Z logaritmiranjem enačbe (2) lahko določimo vrednost prepustnosti pri stopnji tveganja pojava zastoja λ z naslednjo enačbo:

$$C_\lambda = \beta \cdot \alpha \sqrt{-\ln(1-\lambda)}, \quad (5)$$

kjer je C_λ prepustnost avtocestnega odseka pri verjetnosti pojava zastoja λ ; α Weibullov parameter oblike in β Weibullov parameter merila.

V raziskavi [Kianfar, 2021] so pokazali, da se v njihovih primerih bolje kot Weibullova porazdelitvena funkcija za napovedovanje zastojev v delovnih zaporah izkaže Gompertzova porazdelitev, a zaključkov ne velja posplošiti na vse zapore.

1.2 Prepustnost avtocestnega odseka z delovno zaporo

Cestne zapore zmanjšajo prepustnost avtoceste ali hitrost prostega prometnega toka, največkrat oboje, ter s tem vplivajo na odnos med hitrostjo in pretokom. V nadaljevanju predstavljamo, na kakšen način delovna zapora vpliva na prometni tok in od česa je odvisna prepustnost avtocestnega odseka pri zapori. Na tem področju je bilo ponekod v tujini narejenih že kar nekaj raziskav. Povzetki raziskav iz Severne Amerike so predstavljeni v priručniku HCM. V Evropi podobne izsledke različnih raziskav najdemo v nizozemskem priručniku [Grontmij, 2015], švedskem priručniku [Osltam, 2014], nemškem priručniku HBS [FGSV, 2015] in danskem priručniku [Diens Verkeer en Scheepvaart, 2011]. V Sloveniji trenutno nimamo priručnika, s pomočjo katerega bi lahko ocenili vpliv različnih delovnih zapor na prometni tok.

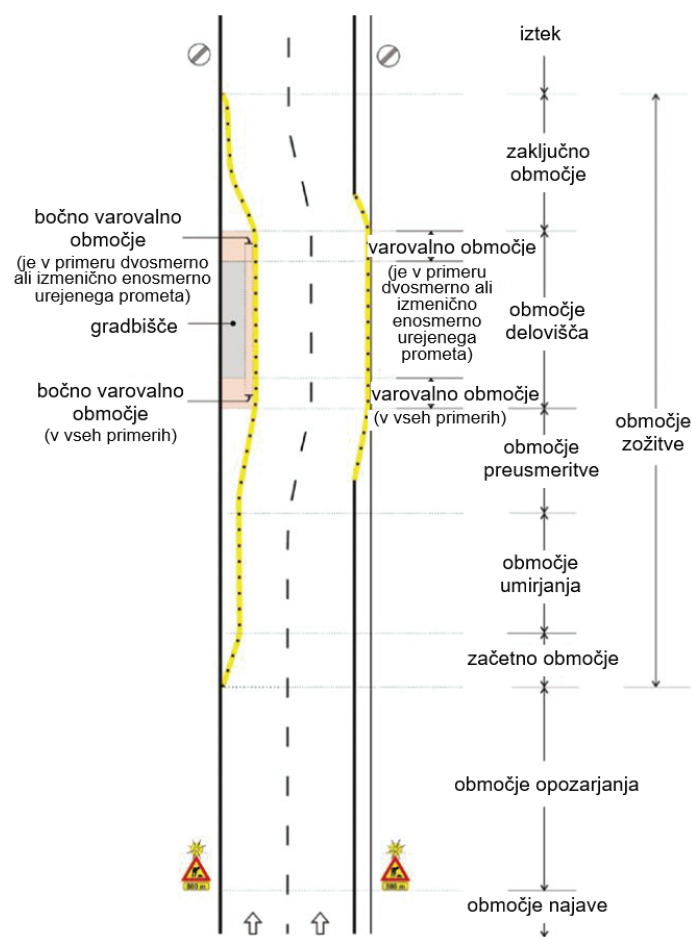
Delovna zapora predstavlja tisti del odseka avtoceste, kjer se izvajajo različna dela v zvezi z vzdrževanjem avtocest. Vsako delovno zaporo sestavljajo štirje sestavni deli: območje opozarjanja na delovno zaporo, prehodno območje, območje izvajanja dejavnosti in območje zaključevanja delovne zapore (glej sliko 2). Najmanj prepustno območje v zapori določa prepustnost delovne zapore. Vpliv nekaterih dejavnikov v cestni zapori je v praksi težko določiti. Tudi raziskovalci ugotavljajo, da še ni razvitega ustreznega modela, ki bi znal ustrezno ovrednotiti vpliv različnih dejavnikov na prepustnost avtocestnega odseka pri zapori ([Strömgren, 2016], [Weng, 2013]). Vse potencialne dejavnike, ki lahko vplivajo na prepustnost delovne zapore, lahko strnemo v pet kategorij:

- Konfiguracija delovne zapore: glede na Pravilnik o zaporah na cestah [UL RS, 2016] lahko konfiguracijo zapor na avtocestnih odsekih obravnavamo glede na naslednje kriterije: popolna ali delna zapora odseka avtoceste, zapora ali delna zapora posameznih pasov, število zaprtih in delno zaprtih prometnih pasov, število vzpostavljenih prometnih pasov v območju zapore, širina prometnih pasov v obmo-

čju zapore, vzpostavitev začasnih prometnih pasov, dolžina delovišča, vrsta (začasne) varnostne ograje, oddaljenost (začasne) robne črte od varnostne ograje, prisotnost montažnih vodilnih robnikov, največja dovoljena hitrost vozil, vodenje prometa v zapori (dvosmerno ali enosmerno, preusmeritev). Po literaturi [Weng, 2013] pa poleg naštetih dejavnikov konfiguracijo zapore določa tudi prisotnost zastorov, ki s prometnih pasov onemogočajo pogled na delovišče.

- Pogoji, ki jih določa cesta: vpliv stopnje urbaniziranosti območja, prisotnost priključnih ramp v območju zapore, vzdolžni naklon, širina prometnih pasov.
- Vpliv delovišča: intenzivnost del v zapori, delovni čas (podnevi/ponoči) in trajanje del (kratkotrajne zapore/dolgotrajne zapore).
- Vremenski vplivi: dež, sneg, vidljivost itd.
- Vplivi prometa: struktura prometa in populacija voznikov (delež tovornih vozil, delež tujih voznikov), način vodenja prometa pred zaporo in v zapori, uporaba inteligentnih transportnih sistemov.

V nekaterih raziskavah se je izkazalo, da dolžina zapore ne vpliva na prepustnost avtocestnega odseka [Heaslip, 2009]. Podobno velja tudi za vpliv trajanja del, saj obstaja več raziskav, ki dokazujejo, da se prepustnost avtocestnega odseka z dolgotrajno zaporo s časom ne poveča ([Al-Kaisy, 2003], [Hajbabaie,



Slika 2. Sestavni deli delovne zapore na avtocesti [UL RS, 2016].

2015], [Yeom, 2015]). Hkrati ugotavljajo, da na prepustnost avtocestnega odseka pri zaporih najbolj vplivajo naslednje spremenljivke: delež težkih tovornih vozil, intenzivnost in vrsta del v zapori, širina prometnih pasov v zapori in prehod na nasprotno smerno vozišče. Prehod na drugo smerno vozišče lahko ob neprimerem vodenju prometa predstavlja ozko grlo zapore. Negativni vpliv delovne zapore na prepustnost lahko na splošno zmanjšamo s primerno signalizacijo in zaščito med prometnim pasom in deloviščem, ki voznikom onemogoča vpogled na gradbišče. Kot navajajo v raziskavi [Al-Kaisy, 2003], se po nekaterih raziskavah prepustnost odsekov s takimi zaporami lahko poviša za 10 %.

V splošnem lahko metode obdelave podatkov za oceno prepustnosti avtocestnega odseka pri zaporih razdelimo v tri skupine, in sicer v parametrične metode, neparametrične metode in simulacijske metode. Po pregledu različnih raziskav avtorji [Mashhadi, 2021] povzemajo slabosti in prednosti posameznih metod. V splošnem nobena metodologija še ni sposobna opisati prepustnosti poljubne avtocestne zapore. Med drugim simulacijski modeli in predlagani neparametrični modeli, ki temeljijo predvsem na nevronskih mrežah, zahtevajo obsežno kalibracijo.

Parametrično oceno prepustnosti odseka lahko obravnavamo kot natančno vrednost (deterministično) ali pa kot slučajno spremenljivko (stohastično). Stohastične metode so primerne predvsem za oceno stabilnosti prometnega toka in za oceno verjetnosti pojava zastoja na določenem odseku pod določenimi pogoji. Deterministične metode so zaradi enostavnejše uporabe primerne predvsem za primerjavo prepustnosti različnih odsekov in prepustnosti odsekov ob različnih zaporah in so manj uporabne pri napovedovanju zastojev.

V prispevku smo za ocenjevanje prepustnosti uporabili oba pristopa. Z deterministično metodo smo pri različnih zaporah ocenili pretoke na avtocestnih odsekih v času zastoja in določili dejavnike, ki na vrednost pretokov v času zastoja vplivajo statistično značilno. S pridobljenimi podatki z avtomatskih števnih mest smo izdelali regresijski model pretokov v času zastoja (pretokov QDR), z metodo največjega verjetja pa smo izdelali porazdelitvene funkcije prepustnosti odsekov pri različnih tipih cestnih zapor.

1.2.1 Modeli prepustnosti avtocestnih odsekov pri delovnih zaporah

V poglavju so predstavljeni nekateri modeli prepustnosti delovnih zapor, ki so izdelani na osnovi terenskih podatkov.

Metodologija HCM 6

Oceno prepustnosti avtocestnega odseka pri zaporih metodologija poda v dveh korakih: v prvem koraku se določijo pretoki skozi zaporo v času zastoja (QDR), v drugem koraku pa se na podlagi povprečnega padca prepustnosti zaradi pojava zastoja α_{wz} določijo vrednosti prepustnosti odseka pri zaporih. Enačba za določitev QDR je bila razvita na podlagi terenskih meritev v ZDA. Raziskave kažejo, da je povprečen relativni padec pretoka vozil $\alpha=7\%$ v pogojih brez delovne zapore [Hu, 2012], ob pogojih delovne zapore pa je ta padec večji, povprečno $\alpha_{wz}=13,4\%$ [Yeom, 2015].

Metodologija HCM 6 upošteva, da so v zapori vzpostavljeni pasovi normalnih širin 3,60 m. Na prepustnost avtocestnega odseka pri cestni zapori vplivajo število zaprtih in odprtih prometnih pasov, tip varnostne ograje, ki delovišče ločuje od dela ceste, kjer poteka promet, razdalja med deloviščem in prometnim pasom ter osvetljenost (dan/noč). Poleg naštetih dejavnikov pa na hitrost prostega prometnega toka v zapori vplivajo še hitrost prostega prometnega toka pred zaporo, hitrostna omejitev v cestni zapori in bližina avtocestnih priključkov.

Metoda HCM 6 neposredno ne razlikuje med dolgotrajnimi in kratkotrajnimi zaporami, čeprav se lahko zaradi učinka učenja voznikov sčasoma prepustnost avtocestnega odseka pri zaporih poveča. Prepričljivih dokazov za to, da bi trajanje postavitve zapore vplivalo na prepustnost avtocestnega odseka v okviru omenjenih raziskav ni bilo možno podati. Bolj kot trajanje postavitve delovne zapore je na prepustnost vplival tip bočne ograje, ki ga velikokrat povezujemo s trajanjem zapore. Za kratkotrajne zapore se pogosto za ločevanje prometnih površin od delovišča uporablja prometne stožce, pri dolgotrajnih zaporah, pri katerih se navadno izvaja gradbena dela v večjem obsegu, pa se večinoma postavi betonske varnostne ograje.

Tip zapore je v metodologiji zajet z indeksom zapore pasu, ki upošteva število odprtih in število zaprtih prometnih pasov:

$$LCSI = \frac{1}{OR N_0}, \quad (6)$$

kjer sta OR delež odprtih pasov – razmerje med številom odprtih pasov v cestni zapori in številom prometnih pasov brez zapore in N_0 število odprtih pasov v cestni zapori.

V prvem koraku metodologija HCM podaja pretok vozil v zapori ob zastoju:

$$QDR = 2093 - 154 LCSI - 194 f_{Br} - 179 f_{AT} + 30 f_{LAT} - 59 f_{DN}, \quad (7)$$

kjer so QDR pretok v času zastoja [eov/h/pas], $LCSI$ indeks zapore pasu; f_{Br} tip bočne ovire ($f_{Br}=0$ za betonske in težka masivne ovire, $f_{Br}=1$ prometni stožci, lahke bočne ovire), f_{AT} vrsta območja ($f_{AT}=0$ za urbana območja (visoka gostota poselitve), $f_{AT}=1$ za ruralna območja (nizka gostota poselitve)), f_{LAT} bočna razdalja od roba prometnega pasu ob delovni zapori do bočne ovire (0-3,6 m), f_{DN} indikator za dan ali noč ($f_{DN}=0$ za dnevno svetlobo, $f_{DN}=1$ za noč).

V drugem koraku se po metodologiji HCM 6 prepustnost avtocestnega odseka pri zaporih določijo na naslednji način:

$$c_{wz} = \frac{QDR}{100 - \alpha_{wz}} 100, \quad (8)$$

kjer je c_{wz} prepustnost odseka avtoceste pri zaporih [eov/h/pas], QDR povprečen pretok vozil v času zastoja [eov/h/pas] in α_{wz} vrednost padca pretoka ob pojavu zastoja [%]. V primeru, da ni znanih podatkov o padcu pretoka α_{wz} lahko privzamemo vrednost $\alpha_{wz}=13,4\%$, vendar se je treba zavedati, da tako izračunana prepustnost avtocestnega odseka pri zaporih ne sme biti višja od prepustnosti istega odseka brez zapore.

Metoda HCM ima določene omejitve, ki se jih je pri analizi cestnih zapor treba zavedati [Transportation Research Board, 2016b]: izračun temelji na vzorcu ameriške raziskave, ki je potekala v njihovem okolju. V primeru, da so na voljo lokalni

podatki, se je boljše opreti nanje. Vpliv tovornih vozil in vzpona zajame v ekvivalentnih faktorjih. Metodo je zato treba previdno uporabljati pri ocenjevanju prepustnosti odseka na strmejših vzponih, kjer je odprt le en prometni pas. V takih pogojih lahko pride do velikega padca pretoka, saj lahko že majhen delež težkih tovornih vozil močno upočasni prometni tok, kar onemogoča visok pretok osebnih vozil. Metoda ne upošteva vpliva zoženih prometnih pasov in vpliva preusmeritve, zato model za zapore, kjer so pasovi ožji od 3,60 m, ali za zapore, kjer je izvedena preusmeritev ni primeren oz. ga je treba v takih primerih kalibrirati.

Model HBS

Metoda, predstavljena v članku [von der Heiden, 2016], je bila razvita za nemški priročnik za načrtovanje cestne infrastrukture – HBS [FGSV, 2015]. V raziskavi so ločeno analizirali kratkotrajne in dolgotrajne zapore. V modelu so upoštevane le tiste spremenljivke, za katere je bilo mogoče dokazati, da statistično značilno vplivajo na prepustnost avtocestnega odseka pri zapori. V omenjeni raziskavi je bilo vključenih 111 kratkotrajnih delovnih zapor in 38 dolgotrajnih zapor. Model za oceno prepustnosti avtocestnih odsekov pri kratkotrajnih zaporah temelji na regresijski analizi pretokov v času zastoja:

$$QDR = c_b \cdot f_{area} \cdot f_{lc} \cdot f_{hs} \cdot f_g \cdot \sum_{i=1}^n f_{w,i} \quad (9)$$

kjer so QDR prepustnost avtocestnega odseka pri zapori, ki je ocenjena na vrednost pretokov v času zastoja [eov/h]; c_b osnovna prepustnost prometnega pasu (določena po nemških smernicah HBS $c_b = 1830$ eov/h), f_{area} redukcijski faktor, ki zajema vpliv lokacije (urbano/ruralno območje), f_{lc} faktor tipa zapore; f_{hs} faktor vpliva uporabe odstavnega pasu v zapori; f_g faktor vpliva vzdolžnega nagiba i , n število pasov v zapori in $f_{w,i}$ faktor vpliva širine i -tega pasu.

Model za oceno prepustnosti avtocestnih odsekov pri dolgotrajnih zaporah temelji na stohastični analizi prepustnosti z določitvijo Weibullovih porazdelitvenih funkcij. Za vrednost prepustnosti je privzet 5. percentil porazdelitvene funkcije urne prepustnosti. S pomočjo nemških smernic in na podlagi ocenjenih vrednosti prepustnosti dolgotrajnih zapor so z metodo najmanjših kvadratov določili enačbo za oceno prepustnosti avtocestnega odseka pri zapori:

$$c = \frac{c_b}{1 + \frac{b_{hv}}{100}} \cdot f_{area} \cdot f_{dm} \cdot f_g \cdot \sum_{i=1}^n f_{w,i} \quad (10)$$

kjer so c prepustnost smernega vozišča v zapori [vozil/h], c_b osnovna prepustnost prometnega pasu, določena po nemških smernicah, f_{area} redukcijski faktor, ki zajema vpliv lokacije (urbano/ruralno območje), f_{dm} faktor, ki upošteva ločen potek istosmernih prometnih pasov, f_g faktor vpliva vzdolžnega nagiba i , n število pasov v zapori, $f_{w,i}$ faktor vpliva širine i -tega pasu in b_{hv} delež tovornih vozil [%].

Model Maryland

Metoda je bila razvita na podlagi pridobljenih podatkov o prometnih obremenitvah in ostalih podatkih o konfiguraciji 12 delovnih zapor. Določili so neodvisne spremenljivke, ki vplivajo na prepustnost avtocestnega odseka pri zapori in razvili naslednji multipla-regresijski model za oceno prepustnosti enega pasu v zapori [Kim, 2001]:

$$C = 1857 - 168,1 \times NUMCL - 37,0 \times LOCCL - 9,0 \times HV + 3,1 \times LD - 21,4 \times WL - 106,1 \times WI_H - 2,3 \times I \times HV, \quad (11)$$

kjer so C prepustnost avtocestnega odseka pri zapori [vozil/h/pas], $NUMCL$ število zaprtih pasov, $LOCCL$ lokacija zaprtega pasu (desni pas = 1, sicer = 0), HV delež težkih tovornih vozil [%], LD razdalja do bočne ovire [m], WL dolžina delovne zapore [km], WI_H intenzivnost del v delovni zapori (1 ali 0) in I vzdolžni naklon v cestni zapori [%].

Pri tem opozarjajo, da predlagan model vsebuje spremenljivke, ki na prepustnost avtocestnega odseka pri zapori ne vplivajo statistično značilno (predvsem lokacija zaprtega pasu $LOCCL$, delež tovornih vozil HV , bočna razdalja LD in dolžina delovne zapore WL).

2 METODA ZA IZDELAVO MODELA PREPUSTNOSTI AVTOCESTNEGA ODSEKA PRI ZAPORI

V prvem delu tega poglavja bomo opisali, katere podatke smo uporabili v analizi in na kakšen način smo jih pridobili, nato pa sledi opis deterministične in stohastične analize prepustnosti.

2.1 Podatki o prometu in zaporah

Podatki o prometu in zaporah zajemajo podatke o prometnih obremenitvah, podatke o cestnih zaporah in nekatere podatke o cestni infrastrukturi.

2.1.1 Podatki s števnih mest

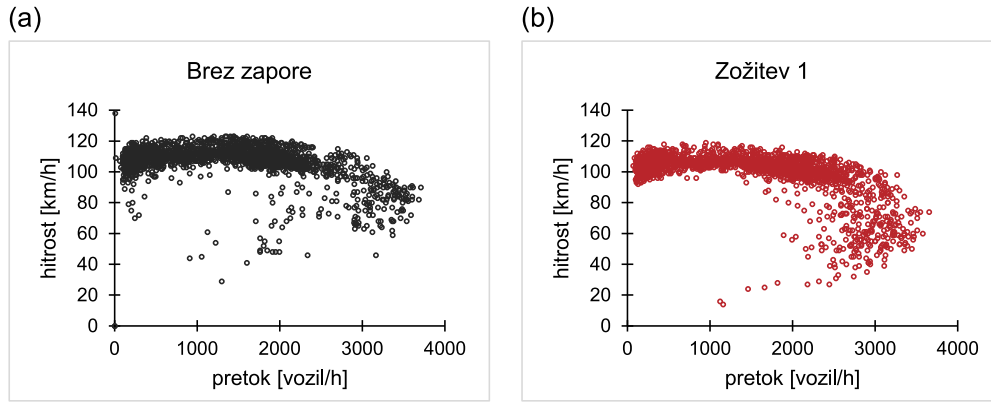
Za vsak zastoj v cestni zapori smo določili števno mesto, ki je v času zastoja na istem odseku beležilo podatke o vozilih, ki so zapeljala skozi zaporo. Glede na lokacijo števnege mesta, zapore in kolone vozil pred zaporo lahko s števnege mesta pridobimo različne informacije. Če se števno mesto nahaja pred zaporo, potem beleži prometno povpraševanje, vse dokler na preseku ni zastoja. Ko se na preseku števnege mesta pojavi zastoj, števno mesto beleži pretok vozil skozi zaporo, ki je manjši od prometnega povpraševanja. Iz podatkov takega števnege mesta lahko ocenimo pretoke pred pojavom zastoja in pretoke v času zastoja. V primeru, da kolona pred delovno zaporo ne doseže preseka, kjer se nahaja števno mesto, tako števno mesto ves čas beleži le prometno povpraševanje. V primeru, da se števno mesto nahaja v območju zapore ali po zapori, le-to beleži pretok vozil skozi zaporo. S takim števnim mestom lahko ocenimo prepustnost avtocestnega odseka pri zapori le v primeru, ko poznamo čas pojava zastoja.

Med kratkotrajne zapore prištevamo tiste, ki trajajo manj kot 24 ur. Za zavarovanje delovišča v kratkotrajni delovni zapori se uporablja prometne stožce, ki sodijo med lahke bočne ovire.

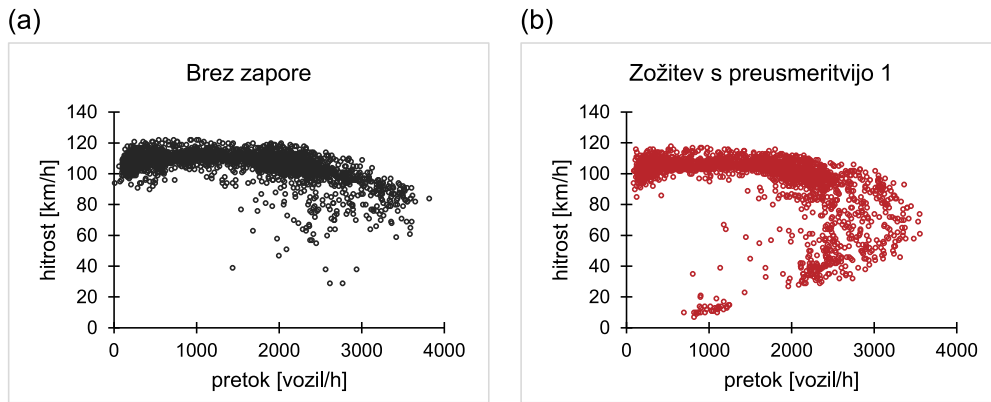
V preiskavo smo vključili 1362 kratkotrajnih zapor iz obdobja od januarja 2013 do julija 2018. Z upoštevanjem lokacij števnih mest, s katerih smo pridobili ustrezne podatke o prometnem toku v zapori, smo v analizo prepustnosti lahko vključili 151 kratkotrajnih delovnih zapor na avtocestah, kjer je bil zaprt eden od obeh prometnih pasov (zaprt vozni ali prehitevalni pas). Ostalih tipov kratkotrajnih zapor v analizo nismo vključili. Značilni indikator za pojav zastoja je dovolj velik padec povprečne hitrosti vozil (vsaj 25 %) in velika gostota prometnega toka.

V sklopu analize dolgotrajnih zapor smo izbrali delovno zaporo, ki je bila postavljena zaradi rušenja cestninske postaje Log in rekonstrukcije dela avtocestnega odseka med Vrhniko in Brezovico v smeri Ljubljane. Delovna zapora je bila v smeri proti Ljubljani postavljena od 12. 5. 2018 do 13. 9. 2018. V tem obdobju so se na območju cestninske postaje Log v smeri od Vrhnike proti Ljubljani izvajale dolgotrajne in kratkotrajne

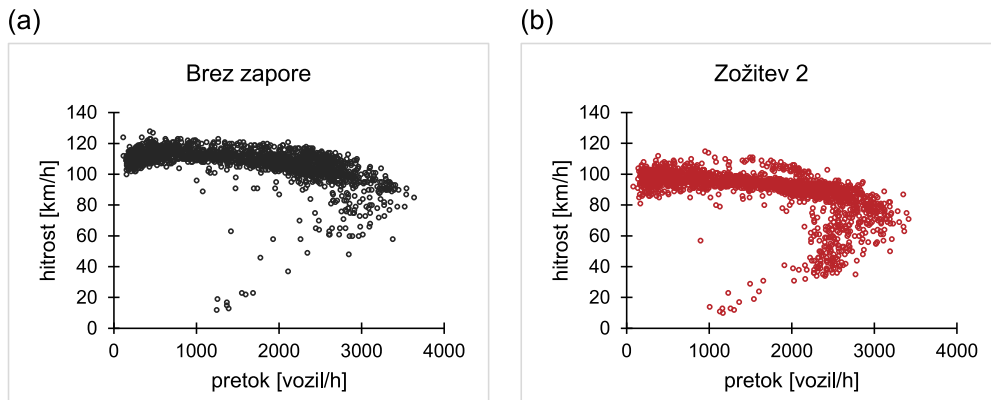
delovne zapore. Pri vseh tipih dolgotrajnih zapor sta bila v smeri proti Ljubljani odprta dva prometna pasova. Posamezne faze so se najbolj razlikovale v širini prometnih pasov in načinu vodenja prometa skozi zaporo (s preusmeritvijo ali brez preusmeritve). Iz analize dolgotrajnih zapor smo zaradi menjave zapore izključili vsak prvi in zadnji dan posamezne faze ter vse termine, ko je bila na preučevanem odseku prišlo do izrednega



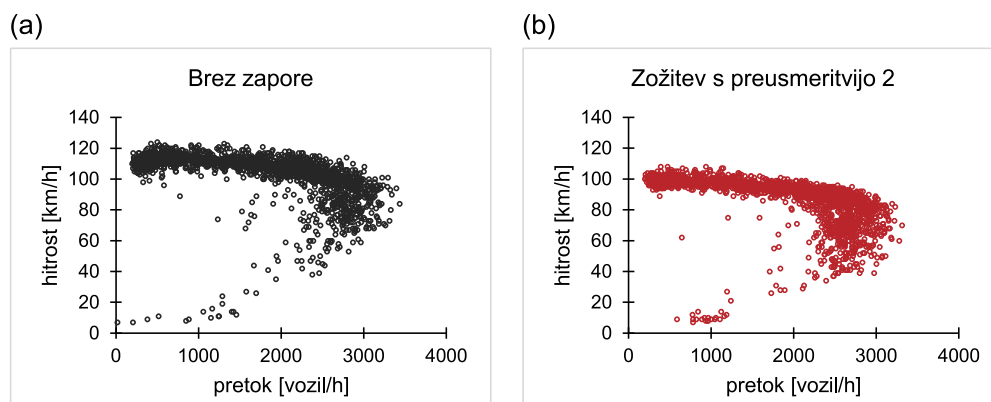
Slika 3. Graf 15-minutnih pretokov in hitrosti prometnega toka (a) v času pred zaporo v obdobju 13. 5. 2017–5. 6. 2017 in (b) v času zožitve obeh pasov v obdobju 12. 5. 2018–4. 6. 2018 (avtocestni odsek Vrhnika–Brezovica, 1 km pred deloviščem).



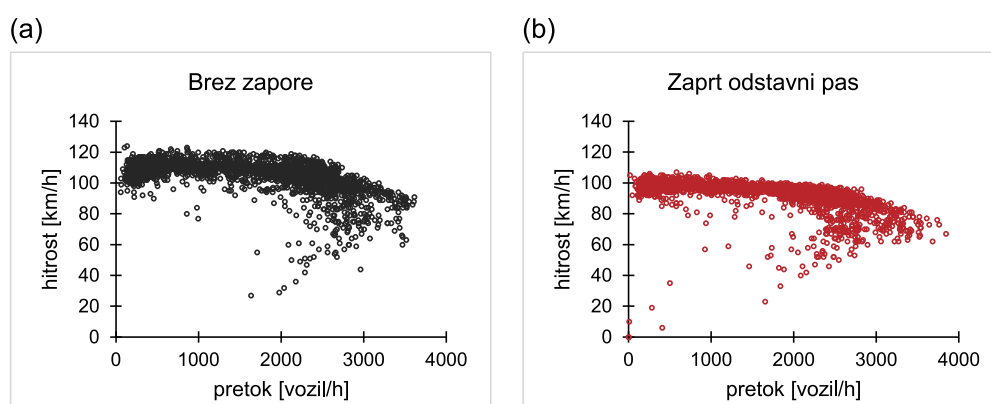
Slika 4. Graf 15-minutnih pretokov in hitrosti prometnega toka (a) v času pred zaporo v obdobju 5. 6. 2017–2. 7. 2017 in (b) v času zožitve s preusmeritvijo v obdobju 4. 6. 2018–1. 7. 2018 (avtocestni odsek Vrhnika–Brezovica, 1 km pred deloviščem).



Slika 5. Graf 15-minutnih pretokov in hitrosti prometnega toka (a) v obdobju brez zapore 2. 7. 2017–24. 7. 2017 in (b) v času zožitve v obdobju 1. 7. 2018–23. 7. 2018 (avtocestni odsek Vrhnika–Brezovica, 1 km pred deloviščem).



Slika 6. Graf 15-minutnih pretokov in hitrosti prometnega toka (a) v obdobju brez zapore 24. 7. 2017–15. 8. 2017 in (b) v času zožitve s preusmeritvijo v obdobju 23. 7. 2018–14. 8. 2018 (avtocestni odsek Vrhnika–Brezovica, 1 km pred deloviščem).



Slika 7. Graf 15-minutnih pretokov in hitrosti prometnega toka (a) v obdobju brez zapore 15. 8. 2017–12. 9. 2017 in (b) v času zaprtega odstavnega pasu v obdobju 14. 8. 2018–11. 9. 2018 (avtocestni odsek Vrhnika–Brezovica, 1 km pred deloviščem).

dogodka (sočasna vzpostavitev dodatne zapore, prometna nesreča). Podatke o 15-minutnih obremenitvah smo pridobili z bližnjega števnege mesta, ki je bil lociran v delovni zapori in sicer 800 m po začetku zapore in približno 1 km pred začetkom delovišča v zapori. Za primerjavo med stanjem brez zapore in stanjem z zaporo smo vključili tudi številne podatke iz primerljivega obdobja v letu 2017.

S slik 3–7 lahko sklepamo, da je v času dolgotrajne zapore prišlo do večjega števila zastojev in zgostitev v primerjavi s primerljivim obdobjem, ko zapora še ni bila vzpostavljena. Vse faze dolgotrajne zapore, ki smo jih analizirali, so postavljene na isti lokaciji na prometno zelo obremenjenem odseku. S števnege mesta lahko zato pridobimo dovolj veliko količino zanesljivih podatkov o zastojih in prometnih obremenitvah, na podlagi katerih lahko ocenimo prepustnosti avtocestnega odseka pri različnih tipih zapor (tako prepustnost kot pretoke v času zastoja).

2.1.2 Analizirani tipi zapor

V preiskavo smo vključili dva tipa zapor z enim odprtim pasom za promet (zaprt vozni pas ali zaprt prehitevalni pas):

- zaprt vozni pas (tip zapore K-3, V-2, V-15 ali V-19 po Pravilniku o zaporah na cesti): zaprt vozni pas in odprt prehitevalni pas;

- zaprt prehitevalni pas (tip zapore K-4, V-3, V-16 ali V-20 po Pravilniku o zaporah na cesti): zaprt prehitevalni pas in odprt vozni pas

in pet različnih konfiguracij zapor z dvema odprtima pasovoma, ki se razlikujejo glede na širino pasov in načinu vodenja prometa v zapori:

- zožitev 1 (tip zapore A-3 po Pravilniku o zaporah na cesti): v smeri proti Ljubljani zaprt odstavni pas in delno zaprt vozni pas; širina pasov: vozni 3,25 m + prehitevalni 2,75 m;
- zožitev s preusmeritvijo 1 (tip zapore C2+2 po Pravilniku o zaporah na cesti): popolna zapora odseka AC – vzpostavljen je dvosmerni promet po štirih prometnih pasovih. V smeri proti Ljubljani preusmeritev prometa na vzporedno vozišče na platoju cestninske postaje; širina pasov: 3,25 m + 2,75 m;
- zožitev 2 (tip zapore C2+2 po Pravilniku o zaporah na cesti): popolna zapora odseka AC – vzpostavljen je dvosmerni promet po štirih prometnih pasovih. V smeri proti Ljubljani širina pasov: 3,00 m + 2,30 m;
- zožitev s preusmeritvijo 2 (tip zapore C2+2 po Pravilniku o zaporah na cesti): popolna zapora odseka AC – vzpostavljen je dvosmerni promet po štirih prometnih pasovih. V smeri proti Ljubljani preusmeritev prometa na nasprotno smerno vozišče; širina pasov: 3,05 m + 2,50 m;
- zaprt odstavni pas (tip zapore A-2): zaprt odstavni pas; širina pasov: 3,75 m + 3,75 m.

S števnih podatkov smo za vsak tip zapore določili obdobja, ko je prišlo do pojava zastoja, in 15-minutna obdobja po pojavu zastoja, za katera smo beležili pretoke v času zastoja. Število posameznih tipov zapor, število zabeleženih zastojev in število 15-minutnih obdobij s pretoki v času zastoja v posameznem tipu zapore prikazuje spodnja preglednica.

ljivkama *LCV* (delež lahkih tovornih vozil) in *HV* (delež težkih tovornih vozil), ko ta znaša 0,29; ostali koeficienti so še nižji. Predlagane spremenljivke lahko tako obravnavamo kot med seboj neodvisne. V predlagan regresijski model pretokov v času zastoja smo v sklopu raziskave zajeli vseh osem izbranih spremenljivk na sledeč način:

Tip zapore	Trajanje zapore	Število analiziranih zapor	Število zabeleženih zastojev	Število 15-minutnih obdobij QDR
Zaprto vozni pas	< 24 h	89	51	431
Zaprto prehitevalni pas	< 24 h	62	36	236
Zožitev 1	23 dni	1	32	32
Zožitev s preusmeritvijo 1	26 dni	1	54	59
Zožitev 2	21 dni	1	33	45
Zožitev s preusmeritvijo 2	22 dni	1	40	33
Zaprto odstavni pas	30 dni	1	12	16

Preglednica 1. Pregled analiziranih tipov zapor, število zabeleženih zastojev in število analiziranih 15-minutnih pretokov v času zastoja.

2.1.3 Podatki o cestni infrastrukturi

Poleg podatkov o cestni zaporih in podatkov o prometnih obremenitvah smo v analizo vključili še nekatere podatke o geometrijskih značilnostih odsekov, na katerih so bile postavljene preučevane zapore. Zanimali so nas lokacije predorov, povprečen vzdolžni naklon ceste v območju zapore, razdalja do avtocestnega priključka in obstoj odstavnega pasu.

2.2 Regresijska analiza pretokov v času zastoja

Na osnovi preučevanih obstoječih regresijskih modelov in na podlagi dostopnih podatkov s terena smo za vsak tip zapore določili osem neodvisnih spremenljivk. Podatkov o vzdrževalnih delih, ki so se izvajala v teh zaporah ni bilo, zato vpliva del ni bilo mogoče upoštevati. Seznam vseh spremenljivk in njihovih vrednosti je prikazan v spodnji preglednici.

Osnovni regresijski model pretokov v času zastoja smo zasnovali na podlagi rezultatov raziskav in s pomočjo obstoječih modelov. Pri tem smo upoštevali, kateri podatki s terena so dostopni, tj. ne moremo upoštevati spremenljivk, za katere nismo mogli pridobiti podatkov (npr. intenzivnost in vrsta del v delovni zapor). Izsledki raziskav, ki so povzeti v metodologiji HCM 6, potrjujejo, da strmejši vzponi močno zmanjšajo prepustnost avtocestnega odseka pri zaporih ob prisotnosti težkih tovornih vozil. Vpliv tovornih vozil na vzponih smo zajeli v spremenljivki *I-HV*. Pri tem smo se zgledovali po modelu Maryland (enačba (11)). V spremenljivki *WEE* (vikend, praznik, sezona) smo v analogiji z metodologijo HCM 6 zajeli vpliv počitniških vozil in tujih voznikov na prepustnost avtocestnega odseka pri delovni zaporih. Pred zasnovo modela smo v zajetem vzorcu vseh pretokov QDR za vsak par spremenljivk iz preglednice 2 izračunali Pearsonov korelacijski koeficient. Najvišjo absolutno vrednost korelacijskega koeficienta zaznamo med spremen-

Spremenljivka	Oznaka	Vrednost
Osnovna prepustnost	c_b	Osnovna vrednost prepustnosti brez redukcije (začetna vrednost) [vozil/h]
Delež lahkih tovornih vozil	<i>LCV</i>	Delež lahkih tovornih vozil v prometnem toku [-]
Delež težkih tovornih vozil	<i>HV</i>	Delež težkih tovornih vozil v prometnem toku [-]
Vzdolžni naklon	<i>I</i>	$\max[i_{300}, i_{700}]$, kjer je i_{300} povprečen naklon na dolžini 300 m, i_{700} pa povprečen naklon na dolžini 700 m.
Prisotnost odstavnega pasu	<i>HS</i>	1-obravnava odsek ima odstavni pas 0-obravnava odsek nima odstavnega pasu
Padavine	<i>P</i>	1-deževno vreme 0-suho vreme
Vikend, praznik, sezona	<i>WEE</i>	1-sezona ali praznik ali vikend 0-delovnik izven sezone
Zapora v predoru	<i>T</i>	1-zapora poteka v predoru 0-zapora ne poteka v predoru
Del dneva (noč/dan)	<i>N</i>	1-zapora se izvaja v nočnem času 0-zapora se izvaja podnevi

Preglednica 2. Seznam izbranih spremenljivk za določitev regresijskega modela za izračun pretokov QDR v zaporah tipa »zaprt vozni pas« in »zaprt prehitevalni pas«.

$$QDR = C_b - k_{LCV} \cdot LCV - k_{HV} \cdot HV - k_{ILCV} \cdot I \cdot (1 + LCV) - k_{IHV} \cdot I \cdot (1 + HV) - k_{HS} \cdot HS - k_P \cdot P - k_{wee} \cdot WEE - k_T \cdot T - k_N \cdot N, \quad (12)$$

kjer so QDR pretok vozil v času zastoja [vozil/h]; k_{LCV} , k_{HV} , k_{ILCV} , k_{IHV} , k_{HS} , k_P , k_{wee} , k_T in k_N pa so regresijski koeficienti spremenljivk, navedenih v preglednici 2.

2.3 Stohastična analiza pretokov

V postopku analize preučujemo časovna obdobja tipa C (obdobja, kjer se pojavi zastoj) in obdobja tipa T (obdobja stabilnega prometnega toka). Vrednost mejne hitrosti, ki predstavlja prehod med tekočim in zgoščenim prometom, je v primeru avtocestnega odseka brez zapore med 70 in 80 km/h [Brilon, 2007]. Prehod med stabilnim in zgoščenim prometnim tokom smo določili na podlagi pojavnosti zastoja. Kriterij za določitev je bil sestavljen iz dveh pogojev, in sicer da ob pojavu zastoja sledi nenaden padec hitrosti (vsaj 25 %) in da hitrost pade pod določen prag (odvisno od tipa zapore – od 50 km/h do 75 km/h). Primer določitve tipov posameznih časovnih obdobj je prikazan na spodnji sliki.

Časovni interval	Hitrost [km/h]	Padec hitrosti	Pretok [voz/h/pas]	Tip obdobja
08.06 10:45	101	-2%	1244	T
08.06 11:00	99	-4%	1346	T
08.06 11:15	95	0%	1394	T
08.06 11:30	95	-25%	1576	C
08.06 11:45	71	13%	1572	Z
08.06 12:00	85	5%	1440	T
08.06 12:15	89	-31%	1632	C
08.06 12:30	61	54%	1590	Z
08.06 12:45	94	2%	1566	T
08.06 13:00	96	-1%	1522	T
08.06 13:15	95	1%	1622	T
08.06 13:30	96	-3%	1456	T
08.06 13:45	93	-32%	1486	C
08.06 14:00	63	-17%	1298	Z
08.06 14:15	52	15%	1430	Z
08.06 14:30	60	33%	1544	Z
08.06 16:30	80	10%	1510	T
08.06 16:45	88	10%	1486	T
08.06 17:00	97	-1%	1202	T
08.06 17:15	96	-6%	1212	T

Slika 8. Primer izpisa podatkov s števnih mest in določitev tipa obdobja (C – pojav zastoja, T – tekoči promet, Z – zastoj). Prikazan primer je s števnega mesta na avtocestnem odseku Vrhnička-Brezovica v času vzpostavljene dolgotrajne delovne zapore.

3 REZULTATI

V poglavju prikazujemo rezultate analize pretokov. V prvem delu prikazujemo povprečne pretoke v času zastoja (QDR), v drugem delu pa so prikazane Weibullove porazdelitvene funkcije prepustnosti za odseke pri preučevanih tipih zapor.

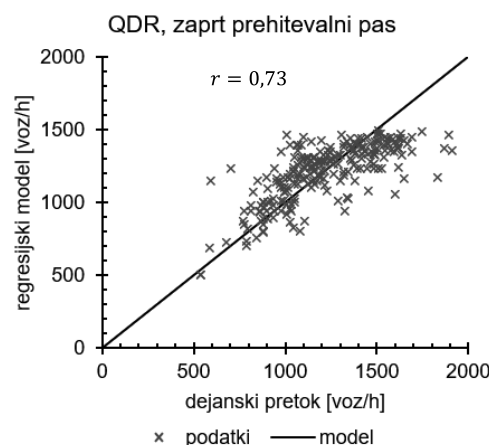
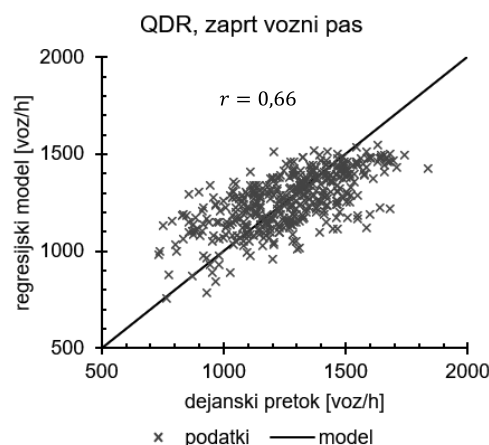
3.1 Pretoki v času zastoja

Za zapore, pri katerih je bil zaprt eden od obeh razpoložljivih pasov, smo izdelali regresijsko analizo in določili statistično značilne spremenljivke, ki vplivajo na prepustnost avtocestnega odseka pri zapori. Za analizirane dolgotrajne zapore

pa prikazujemo le povprečne vrednosti pretokov v času zastoja (QDR), ki so prikazane v spodnji preglednici.

Tip zapore	Število obdobj QDR	Povprečen QDR	Standardni odklon QDR
Zaprto vozni pas	431	1264 vozil/h/pas	215,7 vozil/h/pas
Zaprto prehitelvalni pas	236	1213 vozil/h/pas	269,8 vozil/h/pas
Zožitev 1	32	1437 vozil/h/pas	312,5 vozil/h/pas
Zožitev s preusmeritvijo 1	59	1227 vozil/h/pas	285,5 vozil/h/pas
Zožitev 2	45	1235 vozil/h/pas	158,4 vozil/h/pas
Zožitev s preusmeritvijo 2	33	1261 vozil/h/pas	288,1 vozil/h/pas
Zaprto odstavni pas	16	1395 vozil/h/pas	416,0 vozil/h/pas

Preglednica 3. Analiziran vzorec vseh pretokov v zastoju za različne tipe zapor.



Slika 9. Grafično predstavljeno odstopanje dejanskih vrednosti od regresijskega modela.

Vrednosti korelacijskega koeficienta predlaganih regresijskih modelov znašata $r=0,66$ (determinacijski koeficient $r^2=0,44$) v primeru zapor, kjer je zaprt vozni pas in $r=0,73$ ($r^2=0,53$) v primeru zapor, kjer je zaprt prehitevalni pas. Pridobljeni podatki pretokov QDR nakazujejo na veliko razpršenost. Del razpršenosti lahko pripišemo slučajnosti v prometnem toku, ki je v regresijski model ne moremo zajeti. Del razpršenosti pa lahko pripišemo posplošitvi v modelu, da vse zapore z zaprtim voznim pasom oz. zaprtim prehitevalnim pasom obravnavamo na enak način, saj podatkov o dejanskih tipih zapor, ki jih obravnava Pravilnik o zaporah na cesti, nismo pridobili (pri zaprtem voznem pasu so to tipi K-3, V-2, V-15 ali V-19, pri zaprtem prehitevalnem pasu pa tipi zapor K-4, V-3, V-16 ali V-20). Enačba (13) opisuje povprečen pretok vozil v zaporah v času zastoja, kjer je bil zaprt vozni pas, enačba (14) pa povprečen pretok vozil v času zastoja, kjer je bil zaprt prehitevalni pas:

$$QDR_{ZVoz} = 1596 - 1345 \cdot (LCV + HV) - 17800 \cdot I \cdot HV - 230 \cdot WEE \quad (13)$$

$$QDR_{ZPreh} = 1591 - 1419 \cdot (LCV + HV) - 28000 \cdot I \cdot HV - 180 \cdot WEE \quad (14)$$

Statistično značilnost posameznih vplivov smo preverjali s statističnim testom T. Testirali smo ničelno hipotezo H_0 , da med modelom, ki upošteva vpliv izbrane spremenljivke, in modelom, ki vpliva iste spremenljivke ne upošteva, ni statistično značilnih razlik. V primeru, da se ničelno hipotezo ob stopnji značilnosti $p < 0,05$ zavrže, sprejmemo alternativno hipotezo H_1 , torej da spremenljivka statistično značilno vpliva na vred-

nost predlaganega regresijskega modela. Vplivi, ki so se za oba regresijska modela izkazali kot statistično značilni so delež lahkih tovornih vozil, delež težkih tovornih vozil, vzdolžni naklon in vpliv tujih voznikov (vikend, praznik, sezona) – vrednosti p teh spremenljivk so prikazane v preglednici 4. Vzdolžni naklon zmanjša prepustnost le ob prisotnosti težkih tovornih vozil. Dejavniki, kot so prisotnost predorov, odsotnost odstavnega pasu ali padavine, se v teh primerih niso izkazali za statistično značilne. Na podlagi analize bi lahko sklepali, da ima vzdolžni nagib večji vpliv pri zaporah, kjer je bil zaprt prehitevalni pas, saj je koeficient pred spremenljivko $I \cdot TTV$ višji kot pri zaporah, kjer je bil zaprt vozni pas. Vendar se enačbi na analiziranih podatkih med seboj statistično značilno ne razlikujeta. Razlog za višjo vrednost najdemo v tem, da je bilo pri zaporah tipa, kjer je bil zaprt prehitevalni pas vključen večji delež zapor s strmejšim nagibom in višjimi deleži tovornih vozil. Enačba (13) lahko zato vpliv naklona in tovornih vozil podcenjuje. Pri zaporah z zaprtim odstavnim pasom je do zastojev prihajalo redkeje kot pri ostalih tipih zapor (število obdobji QDR je pri tem tipu zapor najmanjše, kot je razvidno iz preglednice 3). Poleg tega pa so zastoji na avtocestnem odseku pri zapori z zaprtim odstavnim pasom redko trajali več kot 15 minut (to je obdobje agregacije podatkov o prometnih obremenitvah s števnega mesta). To pomeni, da se je kolona vozil na števnem mestu pred zaporo lahko izpraznila že pred iztekom 15-minutnega obdobja. V tem primeru je števno mesto znotraj 15-minutnega obdobja lahko beležilo prometne obremenitve tudi v času, ko ni bilo zastoja (prometno povpraševanje ni presegalo prepustnosti). Izračunane povprečne vrednosti ODR so na avtocestnem odseku pri zaprtem odstavnem pasu zato lahko nekoliko nižje od dejanskih vrednosti QDR.

Spremenljivka	Vrednost p, zaprt vozni pas	Vrednost p, zaprt prehitevalni pas
LCV	0,00	0,00
HV	0,00	0,00
I·HV	0,00	0,01
WEE	0,04	0,03

Preglednica 4. Rezultat statističnega testa T na regresijskem modelu.

3.2 Porazdelitvene funkcije prepustnosti

Po metodi največjega verjetja smo za preučevane tipe zapor določili parametra Weibullove porazdelitvene funkcije α in β . Pri zaporah, kjer je bil zaprt eden od obeh pasov smo ločeno obravnavali tiste na položnem terenu (vzdolžni nagibi do 2 %) in tiste na strmejših in daljših nagibih (vzdolžni nagibi nad 2 % na dolžini vsaj 800 m). V obeh primerih smo privzeli enak

Tip zapore	α	β	Prepustnost C_5 [eov/h/pas]	Prepustnost C_{15} [eov/h/pas]	α_{wz}
Brez zapore	10,43	2510	1887	2108	7,0 %
Zaprt en pas, $i \leq 2$ %	11,72	2041	1583	1747	9,2 %
Zaprt en pas, $i > 2$ %	14,53	1668	1359	1471	9,2 %
Zožitev 1	13,51	1938	1555	1694	5,5 %
Zožitev s preusmeritvijo 1	11,91	1857	1446	1593	9,6 %
Zožitev 2	15,61	1831	1513	1630	9,6 %
Zožitev s preusmeritvijo 2	12,04	1870	1460	1607	9,8 %
Zaprt odstavni pas	9,40	2432	1773	2004	*

Preglednica 5. Rezultati kalibracije Weibullovih parametrov α in β po metodi največjega verjetja, vrednosti 15-minutnih pretokov pri 5 % in 15 % verjetnosti pojavu zastoja ter povprečen padec prepustnosti zaradi zastoja. *Pri zapori, kjer je bil zaprt odstavni pas, zanesljive ocene o padcu prepustnosti iz pridobljenih podatkov ni mogoče pridobiti, saj je večina zastojev trajala manj kot 15 minut.

ekvivalentni faktor tovornih vozil ($E_T=2$). Po metodi največjega verjetja kalibrirane vrednosti parametrov Weibullove funkcije so prikazane v preglednici 5, grafi porazdelitvenih funkcij prepustnosti pa so prikazani na sliki 10.

S slike 10 je vpliv nagiba vozišča na prepustnost avtocestnega odseka pri zaporih očiten. Verjetnost pojava zastoja pri enakem pretoku vozil je lahko v primeru strmejših nagibov tudi nekajkrat višja kot pri položnejših nagibih. Od vseh preučevanih tipov zapor imajo cestne zapore na strmejših nagibih, kjer je zaprt en od obeh prometnih pasov, najmanjšo prepustnost. Izkaže se, da metodologija HCM vpliv naklona s konceptom homogenega prometnega toka v naših primerih zelo dobro zajame vpliv vzdolžnega naklona na tovorna vozila (vrednost faktorja $E_T=2$ za položnejše nagibe in $E_T=3$ za strmejšo nagibe). Najvišjo prepustnost lahko pričakujemo na avtocestnih odsekih pri zaporah, kjer je zaprt le odstavni pas brez dodatnih zožitev pasov. Prepustnost istega odseka brez zapora je za približno 100 ev/h/pas višja. Najnižje vrednosti prepustnosti doseže avtocestni odsek pri zaporih z najožjimi prometnimi pasovi (zožitev 2) in zaporih, kjer je poleg zožitve vzpostavljena tudi preusmeritev prometa (zožitev s preusmeritvijo 1 in 2).

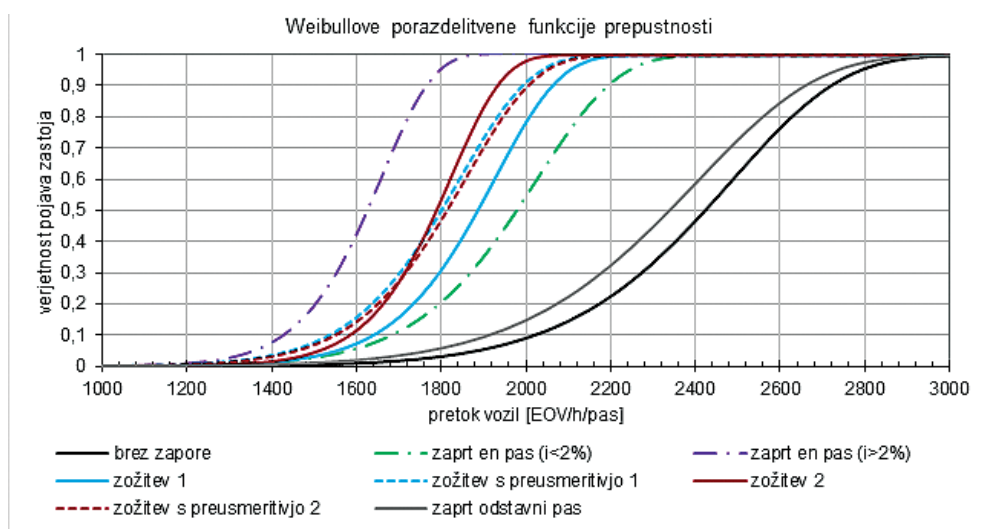
Na podlagi analize ugotavljamo, da ima pri ožjih širinah prometnih pasov v zaporih (skupna širina voznega in prehitevalnega pasu je manj ali enaka 6 m) velik vpliv na zmanjšanje prepustnosti izvedba preusmeritve v zaporih. To so tiste zapore, pri katerih se promet vodi na drugo smerno vozišče ali na sosednje prometne pasove. Ozko grlo takih zapor pogosto predstavlja ravno prehod iz enega prometnega pasu na drug prometni pas, zato je prepustnost avtocestnih odsekov pri takih zaporah lahko manjša kot prepustnost odsekov pri zaporah z ožjimi pasovi brez preusmeritve. Vzrok za zmanjšanje prepustnosti takih zapor lahko najdemo v spremenjenem obnašanju voznikov na mestu prehoda, kjer ob prisotnosti širših vozil (tovorna vozila, avtomodi ipd.) povečajo bočno razdaljo med voziloma ter se s tem pomikajo proti bočni ograji, kar posledično vodi v nižje hitrosti in daljšo medsebojno razdaljo vozil (pretok, ki je produkt hitrosti in gostote, je manjši).

4 SKLEP

V sklopu raziskave smo za preučevane tipe zapor zasnovali porazdelitvene funkcije prepustnosti in določili povprečne pretoke vozil v času zastoja. Izkaže se, da imata obe analizi svoje prednosti in slabosti. Prednost regresijske analize pretokov v času zastoja je predvsem njena lažja uporaba, saj je za kakovostno analizo dovolj že manjše število pojavov zastoja. Metodologije, s katero določamo porazdelitvene funkcije prepustnosti, so primerne predvsem za oceno prepustnosti avtocestnih odsekov pri dolgotrajnih zaporah, pred katerimi večkrat pride do pojava zastoja. Na ta način je pridobljena ocena prepustnosti avtocestnega odseka pri zaporih bolj zanesljiva. Ob vzpostavitvi zapor se zastoje pogosto pojavi takoj ob postavitvi zapora, zato je ocena prepustnosti avtocestnih odsekov pri kratkotrajnih zaporah precej bolj nezanesljiva kot ocena prepustnosti pri dolgotrajnih zaporah. Največji pretok vozil, ki se v posameznem primeru pojavi tik pred pojavom zastoja, namreč ne predstavlja nujno tudi prepustnosti avtocestnega odseka pri delovni zaporih.

Pri zaporah, kjer je bil zaprt eden od obeh pasov, smo ugotovili, da na pretoke v času zastoja statistično značilno vplivajo deleži tovornih vozil, vzdolžni naklon ceste in prisotnost tujih voznikov. Vrednosti ekvivalentnih faktorjev tovornih vozil so v naših regresijskih modelih primerljivi s tistimi, ki jih podaja metodologija HCM tudi na strmejših vzponih. Iz analize pretokov vozil v času zastoja pri zaporah, kjer sta v eno smer odprta dva pasova, se izkaže, da imata na prepustnost velik vpliv predvsem zožitev in preusmeritev. Metodologija HCM, ki jo priznavajo tudi naši predpisi, v primeru vzpostavljenih začasnih prometnih pasov v zaporih (zožitve ali preusmeritve prometa na sosednje prometne pasove) ni ustrezna. V tem primeru namreč metodologija HCM podcenjuje verjetnost pojava zastoja, kar pa je pomembna pomanjkljivost za uporabo v Sloveniji, saj je takšna konfiguracija dolgotrajne zapora relativno pogosta.

Glede na rezultate raziskave ugotavljamo, da je metodologija HCM 6 v primeru obravnavanih avtocestnih zapor brez zožitev in preusmeritev primerna za uporabo v Republiki Sloveniji. V primeru vzpostavitve začasnih prometnih pasov v zaporah (zožitev, preusmeritev) pa metoda, ki jo predlaga HCM 6, ni



Slika 10. Weibullove porazdelitvene funkcije prepustnosti avtocestnih odsekov pri posameznih tipih zapor.

primerna za ocenjevanje prepustnosti avtocestnih odsekov. Pri tem se je smiselno opreti na rezultate naših raziskav in modele iz tujine. Opravljena raziskava je lahko osnova za ocenjevanje vrednosti prepustnosti avtocestnih odsekov pri tipih zapor, ki jih uporabljamo v Republiki Sloveniji. Z ocenjenimi vrednostmi redukcijskih faktorjev prepustnosti avtocestnega odseka lahko določimo nivoje usluge avtoceste tudi pri tistih tipih cestnih zapor, ki jih metodologija HCM ne zajame (zožitve, preusmeritve).

Predlagane ocene prepustnosti avtocestnih odsekov pri različnih zaporah bi lahko izboljšali z bolj natančnimi podatki o samih zaporah (vrsta del v zapori, podatek o tipu zapore glede na Pravilnik o zaporah na cesti) in tako, da bi v raziskavo vključili večje število dolgotrajnih zapor. Pri tem se je treba zavedati, da zanesljive ocene o prepustnosti lahko pridobimo le na tistih odsekih, kjer do zastojev prihaja pogosteje in trajajo dlje časa.

Trenutna orodja za mikrosimulacijo prometnega toka niso sposobna neposredno upoštevati vpliva delovne zapore na prometni tok. Rezultati predstavljene raziskave omogočajo kalibracijo in validacijo mikroskopskih modelov cestnih zapor. Ocena parametrov obnašanja voznikov v primeru cestnih zapor v mikroskopskih modelih tako ponuja široke možnosti za nadaljnje raziskovalno delo.

5 ZAHVALA

Za posredovanje podatkov o avtocestnih zaporah in podatkov o prometnih obremenitvah se zahvaljujemo podjetju DARS, d. d.

6 LITERATURA

Al-Kaisy, A., Hall, F., Guidelines for Estimating Capacity at Freeway Reconstruction Zones, *Journal of Transportation Engineering*, 129, 572-577, 2003.

Brilon, W., Geistefeldt, J., Regler, M., Reliability of Freeway Traffic Flow: A stochastic Concept of Capacity, *Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, College Park, Maryland, julij 2005, Transportation and Traffic Theory, 125 - 144, 2005.

Brilon, W., Geistefeldt, J., Zurlinden, H., Implementing the concept of reliability for highway capacity analysis, *Transportation Research Record* 2027, 1-8, 2007.

Brilon, W., Geistefeldt, J., Implications of the Random Capacity Concept for Freeways, *International Symposium on Freeway and Tollway Operations*, Honolulu, Havaji, ZDA, 21-24 junij 2009, *Transportation and Traffic Theory*, 1-11, 2009.

Diens Verkeer en Scheepvaart, Capaciteitswaarden, Infrastructuur Autosnelwegen Handboek, versie 3, Witteveen Bos, TU Delft, 110 str., 2011.

FGSV, HBS: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen V, Köln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 299 str., 2015.

Geistefeldt, W., Brilon, J. A., Comparative Assessment of Stochastic Capacity Estimation Methods, 2009 Golden Jubil. Proc., 18th Int. Symp. Transp. Traffic Theory, Transportation and Traffic Theory 1999, 430-450, 2009.

Grontmij, Capaciteitswaarden Infrastructuur Autosnelwegen, Handboek, Dienst Water, Verkeer en Leefomgeving, 149 str., 2015.

Hajbabaie, A., Yeom, C., Roupail, N. M., Rasdorf, W., Freeway Work Zone Free-Flow Speed Prediction from Multi-State Sensor Data, *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA, 11-15 januar 2015, *Transportation Research Board*, 13 str., 2015.

Heaslip, K., Kondyli, A., Arguea, D., Elefteriadou, L., Sullivan F., Estimation of Freeway Work Zone Capacity Through Simulation and Field Data, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board* 2130(1), 16-24, 2009.

Hu, N. M. R., J., Schroeder, B. J., Rationale for Incorporating Queue Discharge Flow into Highway Capacity Manual Procedure for Analysis of Freeway Facilities, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board* 2286, 76-83, 2012.

Kianfar, J., Abdoli, S., Deterministic and Stochastic Capacity in Work Zones, Findings from a Long-Term Work Zone, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 147, 1-12, 2021.

Kim T., Lovell D. J., Hall M., Paracha J., A New Methodology to Estimate Capacity for Freeway Work Zones, *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington D.C, USA, Januar 2001, *Transportation Research Board*, 21 str., 2001.

Mashhadi, H., Farhadmanesh, M., Rashidi, A., Marković, N., Review of methods for estimating construction work zone capacity, *Transportation Research Record*, 2675(9), 382-397, 2021.

Olstam, J., TRVMB Kapacitet och framkomlighetseffekter Trafikverkets metodbeskrivning för beräkning av kapacitet och framkomlighetseffekter i vägtrafikanläggningar, *Trafikverket*, 51 str., 2014.

Strömgren, P., Olstam, J., A Model for Capacity Reduction at Roadwork Zone, *Transportation Research Procedia* 15, 245-256, 2016.

Transportation Research Board, Chapter 12: Basic Freeway and Multilane Highway Segments, V: *Transportation Research Board, Highway capacity Manual 6th ed.* Washington, D.C., National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 1-62, 2016a.

Transportation Research Board, Chapter 26: Freeway and highway segments: supplemental, V: *Transportation Research Board, Highway capacity Manual 6th ed.* Washington, D.C., National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 1-13, 2016b.

UL RS, Pravilnik o zaporah na cestah, Uradni list RS št. 4/16 in 132/22, Uradni list Republike Slovenije, 397-542, 2016.

von der Heiden, N., Geistefeldt, J., Capacity of Freeway Work Zones in Germany, *Transportation Research Procedia*, 15, 233-244, 2016.

Weng, J., Meng, Q., Estimating capacity and traffic delay in work zones: An overview, *Transportation Research Part C*, 35, 34-45, 2013.

Yeom, C., Hajbabaie, A., Schroeder, B. J., Vaughan, C., Xuan, X., Roupail, N. M., Innovative Work Zone Capacity Models from Nationwide Field and Archival Sources, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board* 2485, 51-60, 2015.