

UPORABA ROBUSTNE STATISTIKE PRI DOLOČEVANJU POTOVALNIH ČASOV NA AVTOCESTAH

USING OF ROBUST STATISTICS FOR TRAVEL TIME ESTIMATION ON HIGHWAYS

dr. Jure Pirc, univ. dipl. inž. grad.

jure.pirc@q-free.com

Q-free Traffic design, d. o. o., Kamniška 50, 1000 Ljubljana

prof. dr. Goran Turk, univ. dipl. inž. grad.

goran.turk@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Marijan Žura, univ. dipl. inž. grad.

marijan.zura@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 519.2:656.1

Povzetek | Za voznike, cestne operaterje in prometne inženirje podatek o potovalnem času predstavlja najbolj uporabno informacijo pri načrtovanju potovanja v službo, na popoldanske aktivnosti ali na dopust. Potovalni čas posameznega vozila na odseku avtoceste lahko izmerimo z neposredno meritvijo časovnega intervala, ki ga za prevoz odseka potrebuje to vozilo. Za določitev reprezentativne vrednosti potovalnega časa na odseku opravljanja meritve moramo iz zbranih podatkov izločiti osamelce – potovalne čase vozil, katerih skrajšan oz. podaljšan potovalni čas nima vzroka v prometnih razmerah, temveč je posledica individualnega obnašanja posameznega vozila. Večina do sedaj predlaganih algoritmov uporablja klasične statistične metode, ki v primeru potovalnih časov, pridobljenih iz mešanega vzorca osebnih in tovornih vozil, niso sposobni izločiti vpliva počasnejših tovornih vozil. Potovalni časi tovornih vozil so zaradi fizičnih omejitev (fizične lastnosti vozila, nižje predpisane hitrostne omejitve, vpliv naklona trase) namreč bistveno daljši od potovalnih časov osebnih vozil. Ker so za obveščanje voznikov odločilni potovalni časi osebnih vozil, želimo vpliv tovornih vozil izločiti, to pa z obstoječimi algoritmi ni mogoče. Predlagani algoritem z uporabo robustne statistike določi tisto cenilko, ki v razmerah prostega prometnega toka najbolj opisuje voznike osebnih vozil, ki upoštevajo hitrostno omejitev na obravnavanem odseku. Za najbolj primerno robustno statistiko se je izkazal centil, ki ga določimo v fazi kalibracije algoritma v razmerah prostega prometnega toka in ga nato spremljamo tudi v razmerah zunaj prostega prometnega toka, ob predpostavki, da opisuje voznike osebnih vozil, ki drugače vozijo po hitrostnih omejitvah, na njihov potovalni čas pa so med potovanjem vplivale različne motnje znotraj prometnega toka. Evalvacija delovanja algoritma je potekala v različnih razmerah odvijanja prometnega toka. Algoritem se je izkazal za zelo učinkovitega tako za tehnologije z visoko stopnjo penetracije (reidentifikacija registrskih tablic) kot tudi za tehnologije z nizko stopnjo penetracije (reidentifikacija naslovov bluetooth). Primerjava z algoritmi, ki uporabljajo klasične statistične metode, je pokazala, da uporaba robustne statistike bistveno pripomore k natančnejšemu sledenju evolucije potovalnega časa.

Ključne besede: ocena potovalnega časa, neposredno merjenje potovalnega časa, algoritem za oceno potovalnega časa, robustna statistika, izločanje osamelcev

Summary | Highway operators around the world use Automated Vehicle Identification (AVI) based techniques as a technological input for travel time estimation on highways. Various AVI technologies provide various travel time measurement samples: some of them are able to identify only personal cars (e.g. tolling tags), while others provide mixed samples of all vehicle classes (e.g. license plate matching). As the adequate information on travel times should concern personal cars, the influence of heavy vehicles should be eliminated from the samples, which is not feasible with the use of existing travel time estimation algorithms. It was observed that also during congestion travel times of personal cars and heavy vehicles remain dispersed. The motivation for the present study was to introduce an algorithm that would be able to exclude the influence of slower heavy vehicles in travel time estimation for technologies, providing mixed samples of travel time measurements. This was achieved by the use of robust statistics. The results of the study could be used by all highway agencies and operators encountering problems with unreasonably extended estimations of travel times due to the presence of slow heavy vehicles in the traffic flow.

Keywords: travel time estimation, direct travel time measurement, travel time algorithm, robust statistics, outlier elimination

1 • UVOD

O predvidenem potovalnem času vzdolž avtocestnega odseka z zgoščenim prometnim stanjem je za voznike najbolj uporabna prometna informacija (Margulic, 2008), na podlagi katere vozniki lahko prilagodijo svoje potovanje. Pomembnost informacije o potovalnem času na določenem odseku avtoceste je v njegovi široki razpoznavnosti in preprostem tolmačenju za voznike (Markovič, 2010). Informacija o potovalnem času ni pomembna le za voznike, temveč tudi za upravljavce avtocestnega omrežja, ker predstavlja kvantitativno osnovo za oceno uspešnosti odvijanja prometnega toka na prometnem omrežju in je zato kazalnik uspešnosti prometnih strategij, uporabljamo pa jo lahko tudi za zanesljiv kazalnik nastanka zastojev (Berta, 2010). Kljub temu da potovalni čas predstavlja eno izmed osnovnih karakteristik prometnega toka, ga je bilo do pred nedavnim z razumnimi stroški zelo težko natančno izmeriti na večjem vzorcu prometnega toka (El Faouzi, 2010).

V splošnem obstajata dve možnosti ocene potovalnega časa na odseku avtoceste: prva možnost je neposredno merjenje, druga pa posredna ocena (Yeon, 2008). Neposredna meritev predstavlja merjenje časa, ki ga izbrano vozilo potrebuje za prevoz od točke A do točke B. Alternativa neposredni meritvi je posredna ocena potovalnega časa iz izmerjenih spremenljivk prometnega toka, kot sta hitrost in pretok, pridobljenih iz

točkovnih merilcev, in njihovi ekstrapolaciji na pripadajoč odsek izvajanja meritve.

V literaturi najdemo vrsto študij na temo izračuna potovalnega časa iz linijsko pridobljenih meritev. Več avtorjev ((Malinovski, 2010), (Puckett, 2010), (Quayle, 2010), (Soriguera, 2010), (Turner, 1996), (Mirchandani, 2009)) se je ukvarjalo s problemom, kako izločiti osamelce, katerih podaljšan oz. skrajšan potovalni čas nima vzroka v prometnih razmerah na odseku, temveč je posledica individualnega obnašanja vozila. Quayle in Koonce (Quayle, 2010) sta za določitev območja upoštevanja potovalnega časa uporabila metodo drseče standardne deviacije. Algoritem filtriranja podatkov, ki sta ga predlagala Puckett in Vickich (Puckett, 2010), vsako na novo izračunano vrsto potovalnih časov primerja s predhodnim povprečjem. Če le-ta za več kot prag meritve (npr. 25 %) odstopa od prejšnjega povprečja, potem je ta vrednost označena kot neveljavna in je izločena. Dion in Rakha (Dion, 2006) sta želela zagotoviti, da je algoritem filtriranja podatkov uporaben tako v razmerah prostega kot tudi zgoščenega prometnega toka. Kim s sod. (Kim, 2012) so v svoji študiji semaforizirane cestne mreže preverili tri različne metode izločanja osamelcev v potovalnih časih na mestni cestni mreži: metodo drseče standardne deviacije, metodo škatle z brki in metodo časovne vrzeli. Predlagana metoda od Kima s sod. (Kim, 2012) temelji na kombinaciji drseče standardne de-

viacije in fiksni spodnji meji še upoštevanih potovalnih časov. Barceló in sod. (Barceló, 2010) so razvili vrsto tehnik za filtriranje podatkov o potovalnih časih, pridobljenih z reidentifikacijo naslovov bluetooth. Njihova metoda določa spodnjo mejo še upoštevanih potovalnih časov v prostem prometnem toku, s čimer so izločene pretirano visoke hitrosti. Avstrijski raziskovalci, Schneider s sod. (Schneider, 2006), so izločili osamelce v potovalnih časih, pridobljenih iz sistema elektronskega cestninjenja, z uporabo dveh metod: metodo škatle z brki in filtriranje vrednosti z.

Večini predhodno omenjenim raziskavam in algoritmom je skupno to, da temeljijo na predpostavki o normalni porazdelitvi potovalnega časa in reprezentativno vrednost potovalnega časa izračunajo s klasičnimi statističnimi metodami. Če za porazdelitev potovalnih časov uporabimo predpostavko o normalni porazdelitvi, z uporabo statistik, vezanih na normalno porazdelitev (povprečje, standardna deviacija), dobimo rezultate, ki nepravilno opisujejo obnašanje potovalnih časov. S prisotnostjo in izločanjem vpliva osamelcev z uporabo robustnih statističnih metod so se znanstveniki ukvarjali na različnih tematskih področjih: ((Ma, 2010) na področju prometnega inženirstva, (Field, 2010) vodarstva, (Daszykowski, 2006) farmacije). Za oceno reprezentativne vrednosti podatkov z osamelci so namesto povprečne vrednosti predlagali uporabo robustnih statistik, predvsem mediane, kot sta to predlagala Ma in Koutsopoulos (Ma, 2010) v sistemu za določevanje potovalnih časov v Stockholmu.

2 • TEORETIČNI PRISTOP

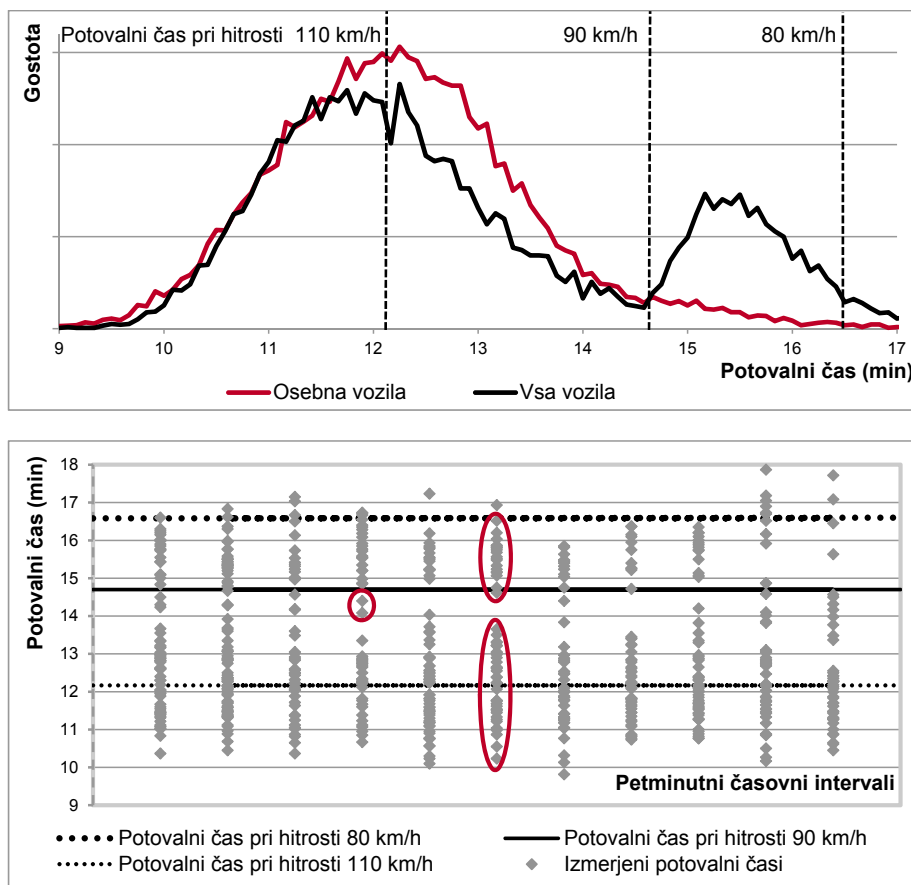
2.1 Robustna statistika

Med našimi raziskavami smo ugotovili, da se potovalni časi na avtocestnem odseku z vmesnimi priključki porazdeljujejo logaritemsko normalno, pri čemer je dobro vidna značilna zamaknenost v desno. Ta zamik v desno je posledica podaljšanih potovalnih časov tovornih vozil in podaljšanih potovalnih časov, ki so pogosti predvsem v primeru vmesnega postanka vozila ali v času nastajanja zastojev.

Robustna statistika predstavlja alternativni pristop standardnim statističnim metodam, njen namen pa je določitev cenilk, na katere prisotnost osamelcev ne vpliva. Osamelec pomeni vrednost opazovanja, ki bistveno odstopa od vzorca večine preostalih opazovanj. Pri izračunu potovalnih časov za osamelce štejemo potovalne čase, katerih skrajšan (npr. motoristi, ki prehitvevajo kolono zaustavljenih vozil) oz. podaljšan (npr. vozila, ki so se ustavila na počivališču) potovalni čas nima vzroka v prometnih razmerah, temveč je posledica individualnega obnašanja posameznega vozila. Prisotnost osamelcev pri meritvah potovalnega časa ima velik vpliv na določitev reprezentativne vrednosti potovalnega časa. Uporaba robustnih metod omogoča avtomatsko zaznavo, označitev in eliminacijo osamelcev (Hampel, 1971) ter je zelo uporabna predvsem pri slučajnih sprememljivkah, ki niso porazdeljene normalno in pri katerih bi velika odstopanja od srednje vrednosti pri uporabi klasičnih statističnih mer pomenila velike spremembe v rezultatih statistik. Z uporabo robustne statistike dobimo zanesljive rezultate statistik tudi pri velikih odstopanjih posameznih vrednosti (osamelcev) od modela.

2.2 Pridobitev reprezentativnega vzorca izmerjenih potovalnih časov z uporabo robustne statistike

V svetu so se uveljavile različne tehnike in tehnologije merjenja potovalnih časov med dvema točkama (CSI, 2012): sistem za razpoznavo registrskih tablic s procesiranjem videoslike in njihovo reidentifikacijo na zaporednih merilnih mestih ((Bertinil, 2005), (Friederich, 2008), (Grüber, 2007), (Yasin, 2009)), sistem za reidentifikacijo naslovov bluetooth ((Haghani, 2010), (Malinovskiy, 2010), (Pucket, 2010)), reidentifikacija medijev za elektronsko cestninjenje (Vuadelle,



Slika 1 • Gostota porazdelitve potovalnih časov (zgoraj) in potovalni časi različnih kategorij vozil (spodaj)

2006), reidentifikacija vozil z analizo videoslike (MacCarley, 2001), določevanje potovalnih časov v zaprtem cestninskem sistemu z uporabo tradicionalnih cestninskih listkov (Soriguera, 2010), reidentifikacija vozil glede na njihovo dolžino (Coifman, 2002) itd. Izbira tehnologije in njena penetracija v veliki meri vplivata na vzorec meritev potovalnih časov, ki ga nadalje obravnavamo. Če se odločimo za reidentifikacijo naprav, ki jih uporablja samo en razred vozil (npr. tablice za elektronsko cestninjenje osebnih vozil), dobimo popolnoma drugačen vzorec izmerjenih potovalnih časov, kot če podatke pridobivamo na osnovi tehnologije, ki zajame celoten prometni tok (npr. reidentifikacija registrskih tablic ali naslovov bluetooth).

V času prostega prometnega toka sta iz zbranih podatkov o potovalnih časih dobro vidni dve večji skupini vozil. Prva so osebna vozila, ki vozijo z naključnimi hitrostmi, razporejenimi okoli povprečne hitrostne ome-

jitve na odseku, katerih naključno porazdelitev hitrosti gre v veliki meri pripisati individualnemu upoštevanju hitrostne omejitve na obravnavani trasi. Drugo večjo skupino predstavljajo tovorna vozila, katerih hitrosti so porazdeljene med 80 in 90 km/h, kolikor glede na posamezno kategorijo tovornega vozila (do 3,5 tone, nad 3,5 tone) znaša najvišja dovoljena hitrost. Vmesne potovalne čase predstavljajo preostale kategorije vozil (kombiji, dostavna vozila ipd.) oz. počasnejša osebna vozila.

V splošnem bi za izračun reprezentativne vrednosti potovalnega časa na odseku želeli pridobiti le meritve potovalnih časov osebnih vozil, saj se ta v prostem prometnem toku gibljejo skorajda brez fizičnih omejitev in so zato merodajna (Soriguera, 2009). V nasprotju z osebnimi vozili na težka tovorna vozila vpliva vrsta dejavnikov (naklon trase, nižje predpisane hitrostne omejitve, fizične omejitve pri vožnji ...), zaradi česar so izmerjeni potovalni

časi tovornih vozil bistveno daljši od tistih, ki jih za prevoz odseka potrebujejo osebna vozila. Ker tovorna vozila za prevoz odseka potrebujejo daljši čas kot osebna, želimo njihov vpliv pri določitvi reprezentativnega potovalnega časa kar se le da zmanjšati.

Če uporabljena metoda reidentifikacije vozil na kontrolnih točkah omogoča le pridobivanje mešanega vzorca potovalnih časov vseh kategorij vozil in če razlikovanje med osebnimi in tovornimi vozili ni mogoče, moramo za zagotovitev reprezentativne vrednosti potovalnega časa uporabiti primerno metodo filtriranja neposredno izmerjenih vrednosti potovalnega časa, na podlagi katerega se voznike obvešča o potovalnem času na odseku.

Ob opaženem dejstvu, da je razpršitev potovalnih časov znotraj izbranega časovnega intervala v času prostega prometnega toka velika in da nekatera vozila dosega bistveno nižje hitrosti kot druga, je več kot očitno, da povprečna vrednost potovalnih časov ne predstavlja reprezentativne vrednosti razmer na trasi. Z uporabo robustne statistike želimo poiskati tisto statistiko, ki v razmerah prostega prometnega toka najbolje opisuje voznike, ki upoštevajo hitrostno omejitev na obravnavanem odseku. To statistiko nato spremljamo tudi v razmerah zunaj prostega prometnega toka, ob predpostavki, da opisuje voznike, ki drugače vozijo po hitrostnih omejitvah, na njihov potovalni čas

pa med potovanjem vplivale različne motnje znotraj prometnega toka.

Pri primerjavi neposredno izmerjenih podatkov o potovalnih časih s potovalnim časom ob upoštevanju predpisane hitrostne omejitve na odseku se je za najbolj uporabno statistiko pokazal centil. Rang centila, ki ga model upošteva za določitev reprezentativne vrednosti potovalnega časa, je nastavljen parameter, ki je odvisen od odseka opravljanja meritve in ga je treba za vsak odsek določiti s kalibracijo. Med kalibracijo določimo vrednost centila, ki v prostem prometnem toku najbolje opiše voznike, ki vozijo po hitrostni omejitvi.

3 • ALGORITEM ZA DOLOČEVANJE LINIJSKEGA POTOVALNEGA ČASA Z UPORABO ROBUSTNE STATISTIKE

3.1 Opis algoritma

Na podlagi reidentifikacije določenega vozila na dveh zaporednih merilnih mestih ob pogoju sinhronizacije ure na obeh lokacijah dobimo izmerjeni potovalni čas, ki ga je vozilo potrebovalo za prevoz obravnavanega odseka:

$$tt_{ABi} = t_{Bi} - t_{Ai} \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

Reprezentativno vrednost potovalnega časa za izbrano časovno obdobje, odsek izvajanja meritve in dnevni oz. nočni režim delovanja izračunamo z eno od naslednjih enačb.

Če je na voljo več kot 20 meritev potovalnega časa, vrednost potovalnega časa izračunamo z uporabo centilne vrednosti za dnevni oz. nočni način delovanja.

$$tt_{AB} = p\text{-ti centil vzorca potovalnih časov } tt_{ABi}, \text{ v časovnem intervalu zajema } \Delta t \quad (2)$$

Če je na voljo od 2 do 20 meritev potovalnega časa, vrednost potovalnega časa izračunamo na podlagi predpostavke o logaritemsko normalni porazdelitvi (Benjamin, 1970).

$$\tilde{m}_{TT} = \frac{m_{TT}^2}{\sqrt{m_{TT}^2 + \sigma_{TT}^2}} \quad (3)$$

$$\sigma_{\ln TT}^2 = \ln\left(\frac{\sigma_{TT}^2}{m_{TT}^2} + 1\right) \quad (4)$$

$$tt_{AB} = \tilde{m}_{TT} \exp(k_\epsilon \sigma_{\ln TT}) \quad (5)$$

V zgornji enačbi m_{TT} predstavlja povprečje vzorca potovalnih časov, σ_{TT}^2 je varianca vzorca potovalnih časov, \tilde{m}_{TT} predstavlja mediano vzorca potovalnih časov, k_α je inverzna kumulativna funkcija standardizirane normalne porazdelitve, ϵ pa je p -ti centil glede na dnevni oz. nočni način delovanja algoritma.

Če sta v časovnem intervalu zajema podatkov na voljo manj kot dve meritvi potovalnega časa, algoritem ni sposoben zagotoviti ocene, zato vrednosti potovalnega časa ne moremo izračunati. Vrednost potovalnega časa v takem primeru ostane enaka kot v prejšnjem časovnem intervalu.

Reprezentativna vrednost potovalnega časa TT_{AB} se izračuna ob predpostavki logaritemsko normalne porazdelitve potovalnih časov, s čimer upoštevamo značilno zamaknenost v desno, ki predstavlja podaljšane potovalne čase. Uporabljen je faktor eksponentnega glajenja α , ki na podlagi števila meritev n v časovnem intervalu t_k in vrednosti parametra občutljivosti β določi vpliv posameznega (trenutnega in prejšnjega) časovnega intervala pri izračunu reprezentativne vrednosti potovalnega časa. Parameter občutljivosti je v modelu nastavljen vrednost med 0,1 in 0,3. Z uporabo vrednosti $\beta = 0,2$ 24 meritev potovalnega časa znotraj časovnega intervala zagotavlja dovolj velik vzorec, da za izračun reprezentativne vrednosti potovalnega časa ne potrebujemo podatkov iz prejšnjega časovnega intervala:

$$TT_{AB} = \exp[\alpha \cdot \ln(tt_{AB}(t_k)) + (1 - \alpha) \cdot \ln(tt_{AB}(t_{k-1}))] \quad (6)$$

$$\alpha = 1 - (1 - \beta)^n \quad (7)$$

V zadnjem koraku reprezentativno vrednost potovalnega časa zaokrožimo na zgornjo vrednost cele minute, da voznikom zagotovimo lažje dojemljivo informacijo.

3.2 Kalibracija algoritma

Za pravilno delovanje algoritma za določevanje potovalnih časov iz neposrednih linijskih meritev je potrebna njegova kalibracija, saj določitev parametrov algoritma ni trivialna. Izračun reprezentativne vrednosti potovalnega časa za časovno obdobje izračuna in odsek opravljanja meritve se izvajata na podlagi predhodno kalibriranega algoritma.

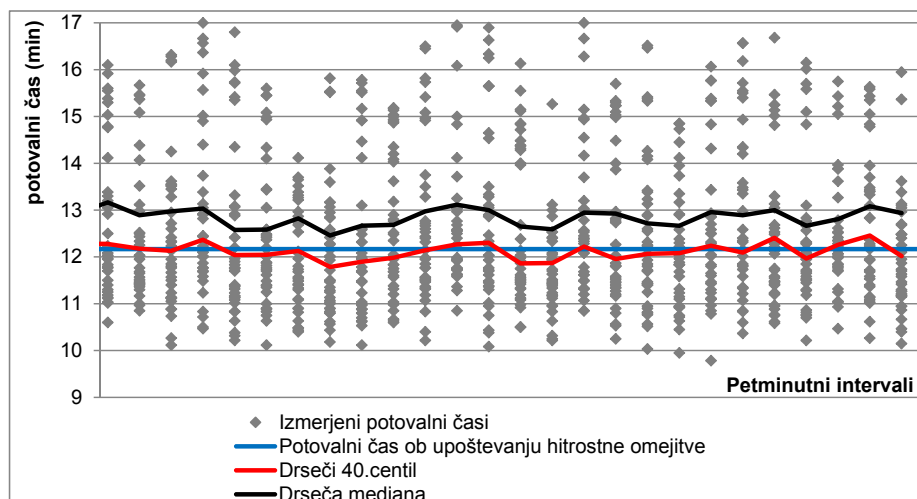
Kalibracija algoritma se izvede za vsak posamezni odsek opravljanja meritve v odvisnosti od uporabljene tehnologije zajema podatkov in je v največji meri odvisna od količine in strukture prometnega toka, ki na danem odseku prevladuje. Kalibracija se izvede v času prostega prometnega toka ločeno za dnevni in nočni režim delovanja. Z izbiro trajanja časovnega intervala zajema podatkov za pridobitev reprezentativnega vzorca potovalnih časov podnevi in ponoči poskušamo pridobiti kar se le da veliko število meritev za zagotovitev reprezentativnega vzorca potovalnih časov.

Glavna naloga kalibracije algoritma je določiti vrednosti robustnih statistik, ki dobro opišejo prometni tok v dnevnem in nočnem času. Na podlagi izmerjenih potovalnih časov je

treba določiti centilni vrednosti za dnevni in nočni čas, ki najbolje opišeta vozila, ki vozijo skladno s hitrostnimi omejitvami na danem odseku. To naredimo s primerjavo korenov povprečnih kvadratnih napak (RMSE) za različne vrednosti centilov potovalnega časa $tt_{i,p}$, izračunanih glede na vrednost potovalnega časa ob upoštevanju hitrostne omejitve $tt_{omejitev}$. Centilna vrednost potovalnega časa z najmanjšo napako se v algoritmu uporabi kot reprezentativen centil.

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (tt_{i,p} - tt_{omejitev})^2} \quad (8)$$

Analiza podatkov za daljše časovno obdobje je za pilotski odsek, predstavljen v nadaljevanju, pokazala, da voznike, ki v prostem prometnem toku podnevi upoštevajo hitrostno omejitev, najbolje opiše vrednost 40. centila podnevi in 10. centila ponoči (slika 2). Naslednji korak kalibracije algoritma določi dnevni in nočni režim delovanja ter prehode med njima. Natančen čas prehoda je odvisen



Slika 2 • Drseči 40. centil predstavlja približno vrednost potovalnega časa za vozila, ki v dnevnem času upoštevajo omejitev hitrosti na odseku

predvsem od količine prometnega toka in deleža tovornih vozil v prometnem toku. Ko so določene vrednosti robustnih statistik in čas delovanja posameznega dnevnega oz. nočnega režima, moramo preveriti, kako algo-

ritem deluje v daljšem časovnem obdobju in kako robusten je na prisotnost osamelcev v prometnem toku. Tu po potrebi naredimo še manjše popravke, kot je npr. zaokroževanje vrednosti za potrebe obveščanja voznikov.

4 • VALIDACIJA DELOVANJA ALGORITMA

4.1 Obstoječi algoritmi za določevanje potovalnega časa

Eden izmed prosto dostopnih algoritmov je v ZDA široko uporabljen algoritem TransGuide, ki je bil razvit na inštitutu Southwest Research (SwRi, 2000). Algoritem določa potovalne čase na odseku med zaporednimi lokacijami samodejne identifikacije vozil z metodo drsečega povprečja in samodejno izloči vse potovalne čase, ki za več kot prag meritve odstopajo od definiranega merodajnega potovalnega časa na izbranem odseku. Potovalni čas na odseku se računa z metodo drsečih povprečij, pri čemer se uporabljata dva parametra: časovni okvir zajema in prag meritve za izločanje osamelcev. Časovni okvir zajema se uporablja za določitev časovnega okvira, ki ga upoštevamo pri izračunu potovalnega časa. V primeru časovnega okvira 5 minut za izračun potovalnega časa upoštevamo le podatke o avtomobilih, ki so v zadnjih 5 minutah prispeli na določeni odsek. Prag meritve se uporablja za izločitev osamelcev. V primeru, da je prag meritve nastavljen na 20 %, to pomeni, da vsi potovalni časi, ki za več kot 20 % odstopajo od potovalnega

časa, določenega v prejšnji časovni iteraciji, ne bodo vključeni v izračun.

Kot je razvidno v nadaljevanju, je algoritem TransGuide pogosto kritiziran zaradi njegove nezmožnosti sledenja nenadnim spremembam. Z željo po sledenju nenadnim spremembam sta Dion in Rakha (Dion, 2006) želela zagotoviti, da bi bil algoritem izločanja podatkov uporaben tako v razmerah prostega kot tudi zgoščenega prometnega toka, torej v primeru stabilnih prometnih razmer, kjer nihanje povprečja ni izrazito, ter tudi v primeru nestabilnih prometnih razmer, katerih posledica so velika nihanja povprečne vrednosti potovalnega časa. Algoritem zagotavlja uporabnost tudi pri manjšem številu podatkov, pridobljenih iz vira samodejne identifikacije vozil. Algoritem izločanja podatkov uporablja dinamično spreminjajoče se območje veljavnosti, ki na podlagi števila meritev v danem časovnem intervalu, števila meritev v prejšnjem časovnem intervalu in na podlagi zaporednih meritev zunaj območja veljavnosti določi veljavne potovalne čase. Algoritem vsako vrednost izmerjenega potovalnega časa, ki je zunaj območja veljavnosti, zavrže.

Zaradi velikih nihanj v izmerjenih potovalnih časih, ki Dion-Rakhovemu algoritmu zaradi uporabe povprečne vrednosti predstavljajo težave pri izračunu reprezentativne vrednosti potovalnega časa, sta avtorja Ma in Koutsopoulos (Ma, 2010) predlagala nadgradnjo algoritma, ki namesto povprečne vrednosti za določitev intervala zaupanja za prihodnji časovni interval uporabi mediano. Mediana se uporabi tudi pri izračunu reprezentativne vrednosti potovalnega časa. Določitev intervala zaupanja za prihodnji interval se izvede na podlagi razpršenosti, ki za določitev namesto povprečne vrednosti uporabi mediano. V vseh algoritmih je bil časovni interval zajema nastavljen na $\Delta t_{dan} = 5$ min. in $\Delta t_{noč} = 15$ min.

4.2 Območje testiranja

Odsek avtoceste A1 čez Trojane med Vranskim in Blagovico, kot del V. Pan-evropskega koridorja med Barcelono (Španija) in Kijevom (Ukrajina), predstavlja enega prometno najbolj obremenjenih avtocestnih odsekov v Republiki Sloveniji (slika 3). Na 22 km višinsko zelo razgibane trase s štirimi predori in velikim številom objektov, kot so nadvozi, viadukti in mostovi, je promet voden z modernim sistemom za nadzor in vodenje prometa. 50 mikrovalovnih detektorjev, 32 videodetekcij-



Slika 3 • Območje testiranja



Slika 4 • Obveščanje voznikov o potovalnem času

skih kamer, 35 videonadzornih kamer, 5 cestno-vremenskih postaj, sistema za merjenje potovalnih časov z uporabo reidentifikacije registrskih tablic in naslovov bluetooth ter 24 grafičnih prikazovalnikov spremenljive prometnoinformativne signalizacije predstavlja ugodno področje za preizkušanje različnih računskih orodij in novih tehnologij.

Na podeželski avtocesti, izpeljani po gričevnatem terenu, prevladuje tranzitni promet, sestavljen predvsem iz tovornih vozil, ki prevažajo tovor med novimi članicami Evropske unije. Povprečni letni dnevni pretok na odseku znaša približno 40.000 vozil; kar 30 % od teh so tovorna vozila, ki imajo bistven vpliv na določevanje potovalnih časov. Delež tovornih vozil se ponoči poveča na 80 %.

Območje testiranja z zahtevno traso in nameščeno opremo zagotavlja velik nabor podatkov tako za razmere prostega prometnega toka kot tudi za različne izredne dogodke (nesreče, neugodne vremenske razmere, zapore ceste, preusmeritve prometa ...), ki se razvijajo v zastoje. Baza podatkov različnih dogodkov se sprti posodablja, kar omogoča preizkušanje izboljšav v realnem prometnem okolju.

Na avtocestnem odseku med Vranskim in Blagovico je bil nameščen pilotski sistem za neposredno merjenje potovalnih časov z reidentifikacijo registrskih tablic in naslovov bluetooth. Odsek je specifičen predvsem zaradi tega, ker na delu odseka velja omejitev hitrosti 100 km/h (70 % dolžine trase), na preostalem delu odseka pa je omejitev hitrosti 130 km/h (30 % dolžine trase).

Na obeh krajnih točkah odseka je bila na obstoječi infrastrukturi sistema za nadzor in vodenje prometa (portali SPIS) postavljena oprema za samodejno razpoznavanje registrskih tablic ter oprema za samodejno zaznavanje naslovov bluetooth (slika 4). Podatki

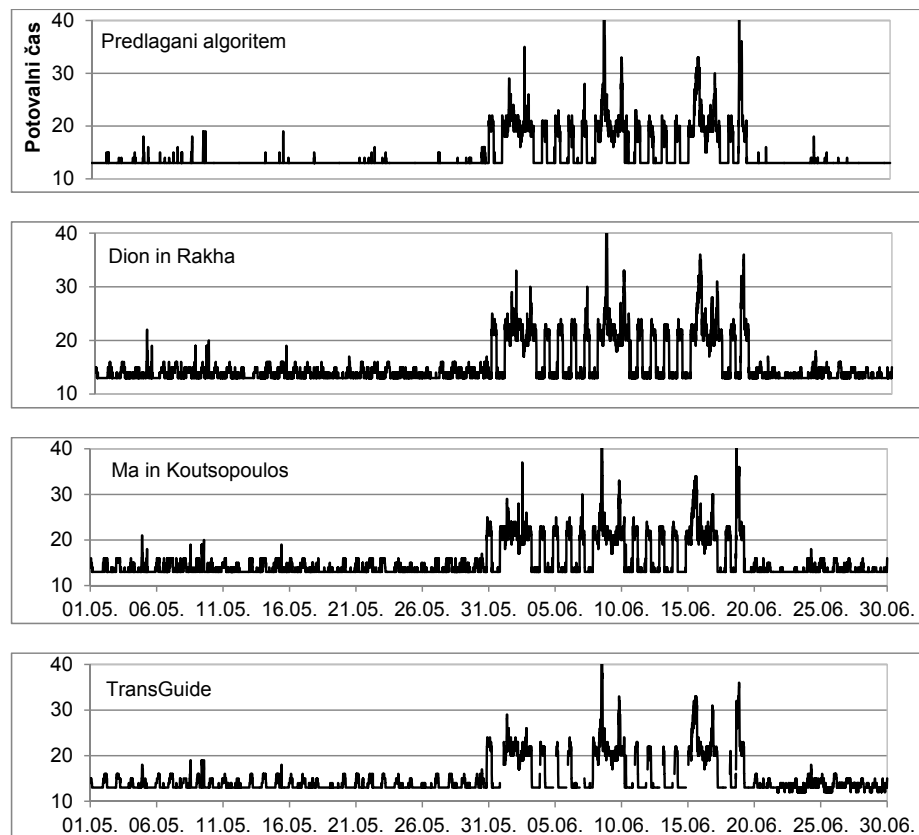
s terena se prenašajo preko optičnega komunikacijskega omrežja do centralnega dela sistema, razvitega za potrebe izračunavanja potovalnih časov. Centralni del sistema je nameščen v regionalnem nadzornem centru Vransko, ki upravlja promet na tem delu avtoceste A1.

4.3 Evalvacija algoritma

Dva meseca smo vzporedno spremljali delovanje algoritmov za določevanje potovalnih časov: pri nas razvitega algoritma, ki

temelji na uporabi robustnih statističnih metod, v ZDA široko uporabljenega algoritma TransGuide, ki potovalne čase izračuna z določitvijo praga meritve in uporabo običajnih statističnih metod, ter Dion-Rakhov in Ma-Koutsopoulosov algoritem, ki po avtorjevem vedenju nista doživela praktične uporabe (slika 5).

V dvomesečnem obdobju primerjave algoritmov smo iz baze podatkov sistema za nadzor in vodenje prometa izluščili 14 različnih izrednih dogodkov, kot so npr. nesreče, dela



Slika 5 • Primerjava določevanja potovalnih časov z različnimi algoritmi (predlagani, TransGuide, Dion-Rakhov in Ma-Koutsopoulosov algoritem) za obdobje dveh mesecev

	Predlagani	TransGuide	Dion	Ma
Povprečni potovalni čas v času razmer prostega prometnega toka: podnevi	13.03 min.	13.06 min.	13.26 min.	13.10 min.
Standardni odklon potovalnega časa: podnevi	0.17 min.	0.30 min.	0.47 min.	0.36 min.
Delež časovnih intervalov s podaljšanim potovalnim časom brez razloga: podnevi	2.3 %	4.3 %	24.0 %	8.1 %
Povprečni potovalni čas v času razmer prostega prometnega toka: ponoči	13.02 min.	14.22 min.	14.32 min.	14.35 min.
Standardni odklon potovalnega časa: ponoči	0.20 min.	1.01 min.	0.80 min.	1.06 min.
Delež časovnih intervalov s podaljšanim potovalnim časom brez razloga: ponoči	1.4 %	70.0 %	85.6 %	73.3 %
Nezmožnost določitve potovalnega časa	0 %	1.75 %	0.008 %	0 %
Primerjava potovalnega časa v času nastanka zastoja (- hitrejši odziv, + počasnejši odziv) *	0 %	-1.0 %	-3.6 %	-1.7 %
Primerjava potovalnega časa v času razpustitve zastoja (- hitrejši odziv, + počasnejši odziv) *	0 %	+8.5 %	+5.5 %	+2.8 %

Preglednica 1 • Primerjava delovanja algoritmov (* predlagani algoritem je vzet kot referenčen, vendar ne nujno najboljši)

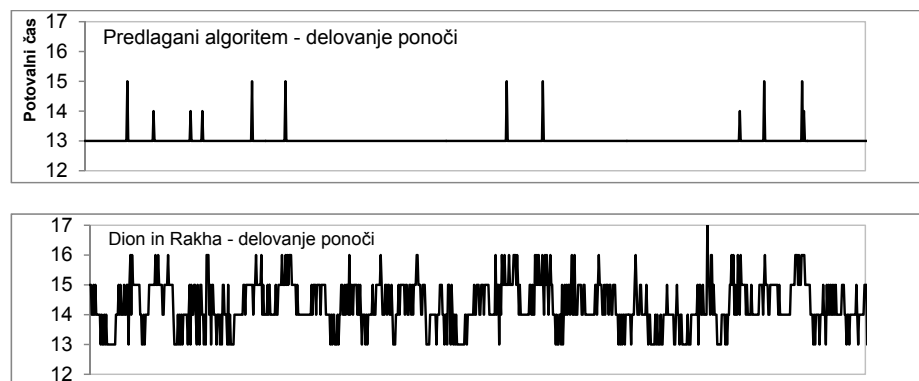
na cesti, močan dež, ter 13 preusmeritev prometnega toka na vzporedno cestno omrežje zaradi del v predorih. Preusmeritev prometa na vzporedno cesto je bila v desetih primerih ponoči med 20:30 in 5:00, v treh primerih med vikendom, od petka od 20:30 do ponedeljka do 5:00.

Primerjava uspešnosti določevanja potovalnih časov z različnimi algoritmi v dnevnem času in razmerah prostega prometnega toka pokaže, da so potovalni časi, določeni z različnimi algoritmi, v povprečju znotraj nekaj sekund (preglednica 1). Vrednosti potovalnega časa se gibljejo okoli vrednosti potovalnega časa ob upoštevanju hitrostne omejitve, ki je za obravnavani odsek 13 minut. Dion-Rakhov algoritem in algoritem TransGuide občasno določata tudi do 30 % podaljšane potovalne čase, kljub temu da so na odseku prevladovali razmere prostega prometnega toka. Algoritma sta brez razloga podaljšane potovalne čase določevala za časovna obdobja vse tja do ene ure.

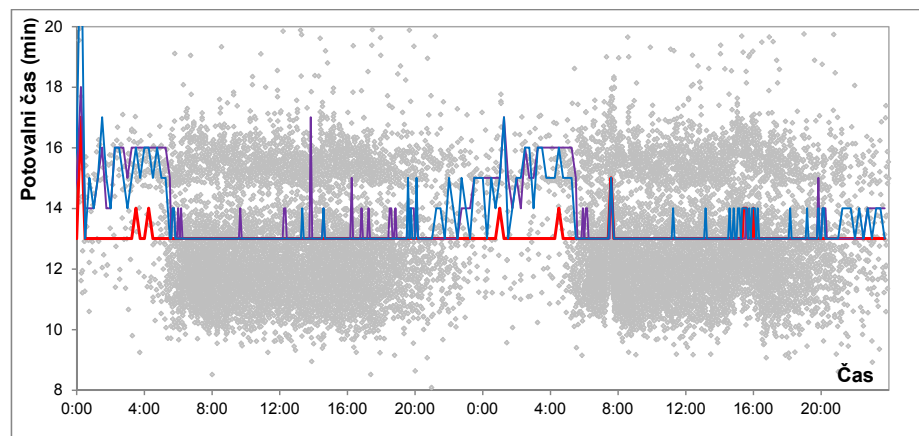
V nočnem času delovanja algoritma, ko pretežni delež prometnega toka predstavljajo tovorna vozila, algoritem TransGuide ter Dion-Rakhov in Ma-Koutsopoulosov algoritem niso bili zmožni izločiti podaljšanih potovalnih časov teh tovornih vozil. V času dvomesečne primerjave algoritmov so omenjeni algoritmi vsako noč določevali do 30 % podaljšane potovalne čase, čeprav so na odseku prevladovali razmere prostega prometnega toka. Dion-Rakhov algoritem je kar 85 % nočnega časa določeval nepravilno podaljšane potovalne čase, ki so trajali tudi po več kot eno uro.

Predlagani algoritem je z upoštevanjem velikega deleža tovornih vozil ves čas pravilno določeval potovalne čase na odseku izvajanja meritve (slika 6). Kljub temu da natančnost

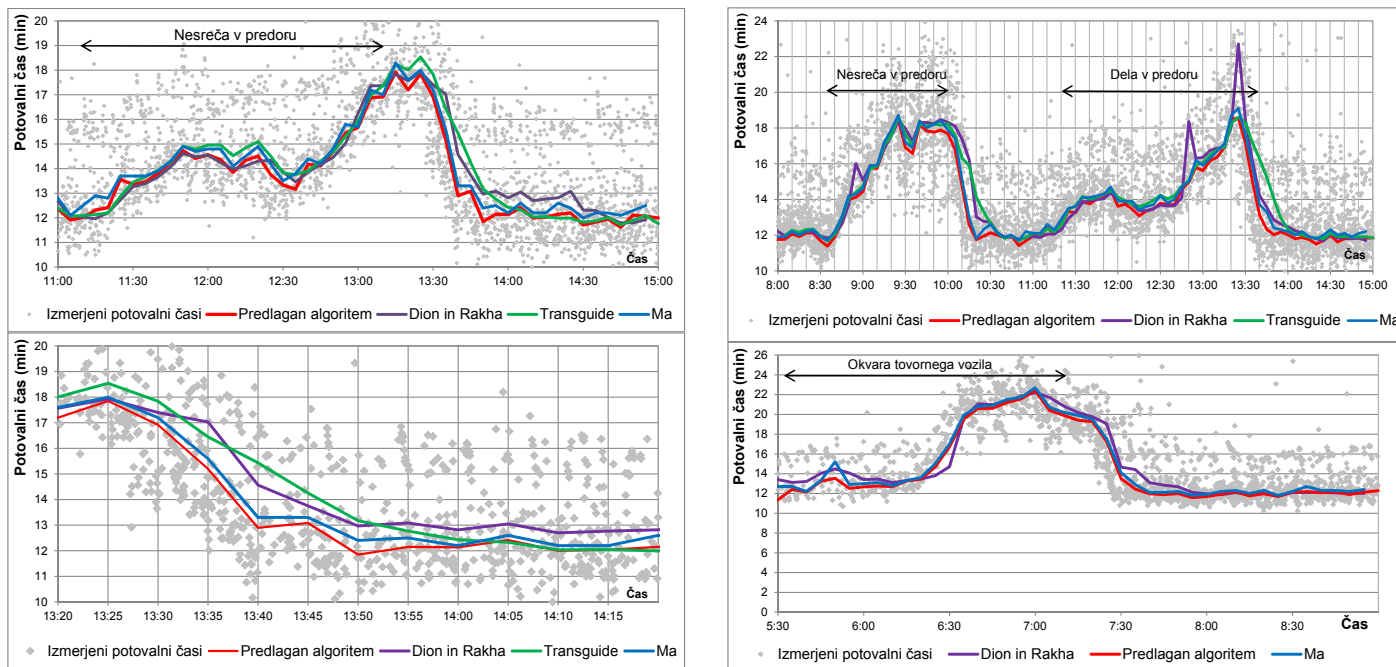
delovanja algoritma v razmerah prostega prometnega toka ni tako pomembna kot v času zastojev, je vseeno zaželeno, da algoritem dobro deluje tudi v teh razmerah (slika 7).



Slika 6 • Robustno delovanje predlaganega algoritma ponoči glede na Dion-Rakhov algoritem za obdobje dveh mesecev



Slika 7 • Primerjava delovanja algoritmov za obdobje dveh noči. Zaradi boljše predstavitve so potovalni časi zaokroženi na zgornjo minuto

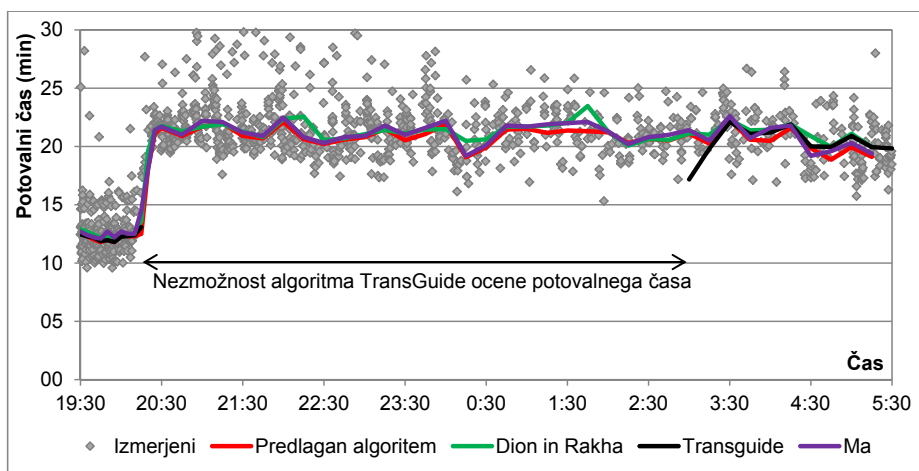


Slika 8 • Primerjava med algoritmi v primeru prometne nesreče, del v predoru in zapore voznega pasu zaradi okvare vozila

Med testiranjem smo primerjali tudi odziv algoritmov v primeru izrednih dogodkov na avtocesti. V primeru zapore voznega pasu v predoru zaradi nesreče ob 11:15 (slika 8, prva slika) je odziv vseh algoritmov na podaljšane potovalne čase zaradi nastanka zastoja podoben. Razlika med algoritmi je prisotna v času razpustitve zastoja (slika 8, druga slika) ob 13:25, kjer predlagani algoritem in Ma-Koutsopoulosov algoritem odreagirata precej hitreje. Predlagani algoritem in Ma-Koutsopoulosov algoritem sta že ob 13:40 ocenila razmere normalnega prometnega toka, medtem ko Dion-Rakhov algoritem in TransGuide sledita deset minut kasneje, ob 13:50. Medtem ko je potovalni čas izračunan s predlaganim algoritmom in posredovan voznikom preko spremenljive prometnoinformativne signalizacije že ob 13:35 padel z 18 na 16 minut, je potovalni čas, ocenjen z Dion-Rakhovim algoritmom, še vedno imel vrednost 18 minut. Deset minut kasneje, ob 13:40, je predlagani algoritem voznike že obveščal o potovalnem času 13 minut, medtem ko je Dion-Rakhov algoritem voznike obveščal o 15-minutnem potovalnem času, algoritem TransGuide pa celo o 16-minutnem potovalnem času. Podobno obnašanje algoritmov je bilo opaženo tudi v primeru drugih izrednih dogodkov, kot so v primeru prometne nesreče in del v predoru v istem dnevu (slika 8, tretja slika). Kot je razvidno s slike, se je predlagani algoritem po končanju del v predoru precej hitreje odzval. Medtem ko je predlagani algoritem

že ob 13:40 ocenil normalne razmere, sta se Dion-Rakhov in Ma-Koutsopoulosov algoritem odzvala z desetminutnim zamikom, algoritem TransGuide pa celo s 15-minutnim zamikom. Podoben odziv algoritmov je razviden tudi v primeru zapore pasu zaradi okvare tovornjaka (slika 8, četrta slika). V vseh obravnavanih primerih se je v času razpustitve zastoja predlagani algoritem odzval precej hitreje, medtem ko je Dion-Rakhov algoritem občasno ocenil precej podaljšane potovalne čase zaradi vključitve tretje zaporedne vrednosti zunaj območja upoštevanih meritev, ki pa je bila osamelec.

Algoritem TransGuide deluje nepravilno tudi pri preusmeritvi prometnega toka na sekundarno cestno omrežje v času zapor odseka Vransko-Blagovica, torej v situaciji, ko po postavitvi zapore potovalni časi vozil zelo hitro narastejo na skoraj dvakratno vrednost s 13 minut na 22 minut. Ker algoritem TransGuide pri izračunu upošteva le vrednosti potovalnega časa, ki so za do 20 % podaljšane od vrednosti potovalnega časa v prejšnjem časovnem intervalu, ni sposoben slediti veliki spremembi potovalnih časov. Slika 9 prikazuje situacijo, ko algoritem kar 6 ur ni bil sposoben upoštevati nobene meritve, čeprav jih je bilo

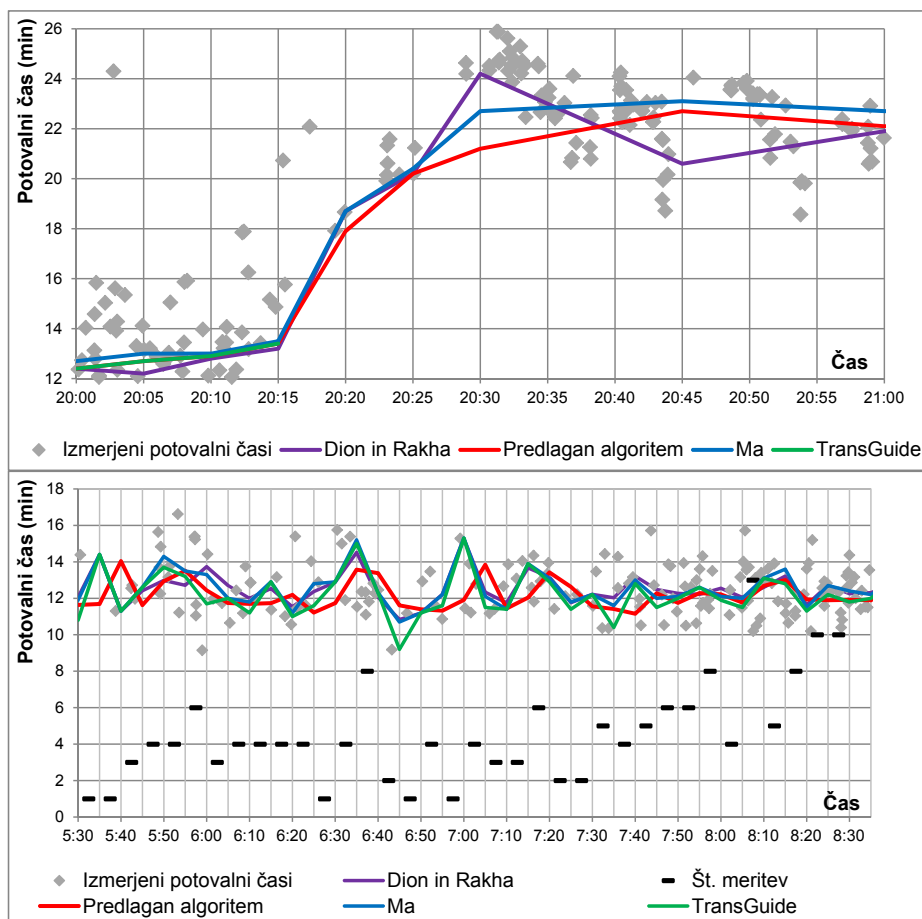


Slika 9 • Algoritem TransGuide zaradi nenadne spremembe v potovalnih časih, večje od 20 % glede na predhodni časovni interval, te ni bil sposoben zaznati - informacija za voznike zato 7 ur ni bila na voljo

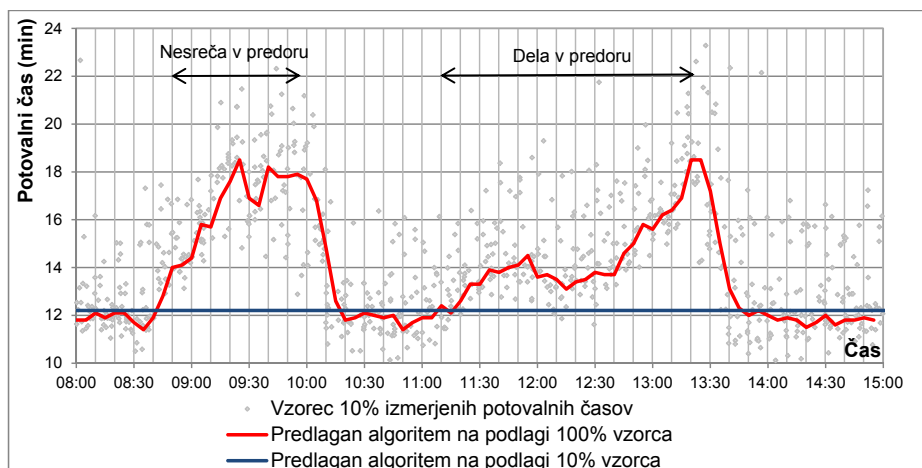
veliko. Ker algoritem ni bil sposoben zaznati podaljšanih potovalnih časov, informacija za voznike, čeprav bi jo ti v tem času najbolj potrebovali, ni bila na voljo skoraj 7 ur.

V času dvomesečne primerjave delovanja algoritmov se je zelo redko zgodilo, da bi bilo v posameznem časovnem intervalu zajema na voljo manj kot pet meritev potovalnega časa. Slika 10 prikazuje teh nekaj primerov. Glavno razliko med ocenjenim potovalnim časom med algoritmi (slika 10, prva slika) lahko pripišemo dejstvu, da predlagani algoritem uporablja nižjo vrednost parametra občutljivosti β , ki v primeru majhnih vzorcev daje prioriteto glajenju. Kot je razvidno (slika 10, druga in tretja slika), prednost glajenja pred hitrim odzivom pomeni manj nihanj. Medtem ko predlagani algoritem ter Dion-Rakhov in Ma-Koutsopoulos algoritem dobro ocenijo potovalne čase v primeru majhnega vzorca, pa po drugi strani algoritem TransGuide popolnoma odpove. Od 20:15 dalje zaradi velike spremembe, večje od 20 %, ni bil več sposoben oceniti vrednosti potovalnega časa.

Delovanje predlaganega algoritma smo preverili tudi v primeru zmanjšanja prvotne velikosti vzorca za 90 %, kar pomeni, da je bilo na voljo le 10 % prvotnih meritev (slika 11). Glede na to, da sistem reidentifikacije registrskih tablic zaradi vmesnih priključkov upari približno 70 % vseh potovanj, to pomeni, da je predlagani algoritem sposoben natančno oceniti potovalne čase na odsekih za tehnologije, ki imajo stopnjo penetracije manjšo od 7 %.



Slika 10 • Primerjava delovanja algoritmov v primeru majhnega vzorca v času izrednega dogodka (prva slika) in v času razmer prostega prometa na praznični dan (druga in tretja slika)



Slika 11 • Primerjava delovanja algoritmov v primeru zmanjšanja velikosti vzorca za 90 %

5 • SKLEPI

Namen študije je bil izdelati robusten algoritem za določevanje potovalnih časov, pridobljenih iz linijskih meritev, ki bo kljub prisotnosti osamelcev v potovalnem času sposoben dobro oceniti reprezentativno vrednost potovalnega časa na avtocestnem odseku. Želja je bila z uporabo robustne statistike poiskati tisto statistiko, ki v razmerah prostega prometnega toka najbolje opisuje voznike, ki upoštevajo hitrostno omejitev na obravnavanem odseku. To statistiko nato spremljamo tudi v razmerah zunaj prostega prometnega toka, ob predpostavki, da opisuje voznike, ki drugače vozijo po hitrostnih omejitvah, na njihov potovalni čas so med potovanjem vplivale različne motnje znotraj prometnega toka.

Algoritem na podlagi izmerjenih potovalnih časov na odseku z uporabo primerne vrednosti centila izračuna reprezentativno vrednost potovalnega časa, s katero voznike obveščamo o potovalnem času na odseku. Vrednosti centila in časovni okvir delovanja določimo v fazi kalibracije algoritma na izbranem avtocestnem odseku.

Evalvacija delovanja algoritma je potekala v različnih razmerah odvijanja prometnega toka: od prostega prometnega toka podnevi in ponoči, v času izrednih dogodkov na avtocestni trasi in tudi v času preusmeritve prometnega toka na sekundarno cestno omrežje. Algoritem se je izkazal za zelo učinkovitega tako za tehnologije z visoko kot tudi nizko

stopnjo penetracije. Primerjava z algoritmom, ki uporablja klasične statistične metode, je tako pokazala, da uporaba robustne statistike bistveno pripomore k natančnemu sledenju evolucije potovalnega časa.

Neposredno izmerjeni potovalni časi na odseku med dvema kontrolnima točkama predstavljajo natančno informacijo, pridobljeno s sledenjem posameznih vozil, ki pa vsebuje določeno časovno zakasnitev v primerjavi z dejanskim potovalnim časom, ki ga bo potreboval voznik, ki na odsek šele vstopa. Nadaljnje delo bo potekalo predvsem v smeri aktualizacije informacije o potovalnem času, ki jo bomo po predvidevanjih dosegli z združitvijo podatkov iz točkovno izmerjenih hitrosti na vmesnih lokacijah med kontrolnima točkama neposredno izmerjenih potovalnih časov.

6 • ZAHVALA

Raziskavo sta delno financirala Evropska unija – Evropski regionalni sklad za razvoj Republike Slovenije, ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo, ter podjetje Q-free Traffic design, d. o. o.

7 • LITERATURA

- Barceló, J., Montero, L., Marqués, L., Marinelli, P., Carmona, C., Travel time forecasting and dynamic OD estimation in freeways based on Bluetooth traffic monitoring. Proceedings of the 89th Annual meeting of the transportation research board, Washington D.C., USA, 2010.
- Benjamin, C.A., Cornell, J.R., Probability, statistics and decision for civil engineers. McGraw-Hill, 1970.
- Berta, T., Török, A., Travel time reduction due to infrastructure development in Hungary. *Promet – Traffic & Transportation*, 22, (1), 2010.
- Coifman, B., Estimating travel times and vehicle trajectories on freeways using dual loop detectors. *Transportation research part A* 36, 4, 351–364, 2012.
- CSI, Cambridge Systematics Inc., Travel time data collection – White paper. Florida department of transportation, District IV, 2012.
- Daszykowski, M., Kaczmarek, K., Yander Heyden, Y., Walczak, B., Robust statistics in data analysis-A review basic concepts. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Volume 85, 203–219, 2006.
- Dion, F., Rakha, H., Estimating dynamic roadway travel times using automatic vehicle identification data for low sampling rates. *Transportation Research Part B*, 40, (9), 745–766, 2006.
- El Faouzi, N.-E., Billot, R., Bouzedba, S., Motorway travel time prediction based on toll data and weather effect integration. *IET Intelligent Transport Systems*, 4, (4), 338–345, 2010.
- Field, M. S., Application of robust statistical methods to background tracer data characterized by outliers and left-censored data. *Water research* 45, 3107–3118, 2010.
- Friederich, M., Jehlicka, P., Schlaich, J., Automatic number plate recognition for the observance of travel behavior. 8.th international conference on survey methods in transport: Harmonisation and data comparability, Annecy, Francija, http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publication/downloads/200805_Fr_PJ_JS-ANPR.pdf, 2008.
- Grüber, B., Röhr, T., Reisezeitmessungen setzen sich durh. *Strassenverkehrstechnik* 5, 264–267, 2007.
- Haghani, A., Masoud, H. Kaveh F.S., Young S., Tarnoff P., Freeway travel time ground truth data collection using bluetooth sensors. Presented at TRB 2010 annual meeting proceedings, Washington D.C., <http://trb.metapress.com/content/4885780436228757/>, 2010.

- Hampel, F.R., A general qualitative definition of robustness. *The Annals of Mathematical Statistics*, 42, (6), 1887–1896, 1971.
- Kim, S.D., Porter, J.D., Magaña, E.M., Wireless data collection system for travel time estimation and traffic performance evaluation – Final report. Oregon department of transportation and Federal highway administration, USA, 2012.
- Ma, X., Koutsopoulos, H., Estimation of the automatic vehicle identification based spatial travel time information collected in Stockholm. *IET Intelligent Transport Systems*, 4, (4), 298–306, 2010.
- MacCarley, A. C., Video-based vehicle signature analysis and tracking system phase 2: Algorithm development and preliminary testing. California PATH Working paper, Institute of Transportation studies (UCB), UC Berkley, ZDA, 2001.
- Malinovskiy, Y., Wu, J. Y., Lee, U. K., Field experiments on Bluetooth based travel time data collection. Proceedings of the 89th Annual meeting of the transportation research board, Washington D.C., USA, 2010.
- Margulici, J. D., Ban, X., Benchmarking travel time estimates. *IET Intelligent Transport Systems*, 2, (3), 228-237, 2008.
- Markovič, H., Bašić, B. D., Gold, H., Dong, F., Hirota, K., GPS data based non-parametric regression for predicting travel times in urban traffic networks. *Promet – Traffic & Transportation*, 22, (1), 1–13, 2010.
- Mirchandani, P. B., Gentili, M., He, Y., Location of vehicle identification sensors to monitor travel-time performance. *IET Intelligent Transport Systems*, 3, (3), 289–303, 2009.
- Puckett, D.D., Vickich, M.J., Bluetooth-based travel time speed measuring systems development – Final report. Department of Transportation, research and Innovative Technology Administration, Washington, D.C., USA, 2010.
- Quayle, S.M., Koonce, P., Arterial performance measures using MAC readers - Portland's experience, <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2010/NATMEC/Quayle.pdf>, 2010.
- Schneider, M., Linauer, M., Hainitz, N., Koller, H., Traveller information service based on real-time toll data in Austria. *IET Intelligent Transport Systems*, 3, (2), 124–137, 2009.
- Soriguera, F., Rosas, D., Robusté, F., Travel time measurement in closed toll highways. *Transportation Research Part B*, 44, (10), 1242–1267, 2010.
- SwRI, TransGuide model deployment report - Design report. Report prepared for TransGuide, Texas department of Transportation, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, USA, 2000.
- Turner, S. M., Eisele, W. L., Benz, R. J., Holdener, D. J., Travel time data collection handbook. Research report FHWA-PL-98-035. Federal Highway Administration. Washington, D.C, ZDA, 2010.
- Vuadelle B., Système d'information de temps de parcours sur le réseau autoroutier AREA. Proceedings of ASECAP meeting, Pula, Hrvatska: 105–115, <http://www.asecap.com/english/documents/SESSION1BAREA.pdf>, 2006.
- Yasin, A. M., Karim, M. R., Travel Time Measurement in Real-Time using Automatic Number Plate Recognition for Malaysian Environment. *Journal of Eastern Asia Society For Transportation Studies*, 8, 2009.
- Yeon, J., Elefteriadou, L., Lawphongpanich, S., Travel time estimation on a freeway using Discrete Time Markov Chains. *Transportation Research Part B*, 42, (4), 325–338, 2008.