

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Špela Čopi

**Simuliranje prometnih zgostitev na  
avtocestah**

DIPLOMSKO DELO

INTERDISCIPLINARNI UNIVERZITETNI  
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE  
RAČUNALNIŠTVO IN MATEMATIKA

MENTOR: izr. prof. dr. Iztok Lebar Bajec

SOMENTOR: doc. dr. Jure Demšar

Ljubljana, 2018

COPYRIGHT. Rezultati diplomske naloge so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavo in koriščenje rezultatov diplomske naloge je potrebno pisno privoljenje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

*Besedilo je oblikovano z urejevalnikom besedil L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.*

Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Tematika naloge:

S pomočjo računalniških simulacij, ki posnemajo pojave iz sveta okoli nas, si lahko odgovorimo na marsikakšno vprašanje o simuliranih pojavih. V diplomski nalogi s pomočjo računalniške simulacije prometa na avtocesti ugotovite, kako upoštevanje cestno prometnih predpisov vpliva na tvorjenje zastojev in posledično na čas vožnje. Da bodo rezultati čimbolj relevantni, pri izdelavi simulacije, upoštevajte dejanske lastnosti različnih tipov voznikov ter strukturo prometa na naših avtocestah.

*Zahvaljujem se širši družini, sošolcem, prijateljem in Blažu za pomoč ter podporo tekom celotnega študija. Poleg tega tudi mentorju in somentorju za dobro vodenje pri izdelavi diplomske naloge.*

# Kazalo

Povzetek

Abstract

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Uvod</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivacija in opredelitev problema . . . . . | 2         |
| <b>2</b> | <b>Pregled literature</b>                    | <b>3</b>  |
| 2.1      | Avtocesta . . . . .                          | 3         |
| 2.2      | Predhodnica simulacije . . . . .             | 4         |
| 2.3      | Matematični modeli vozil . . . . .           | 5         |
| <b>3</b> | <b>Metode</b>                                | <b>13</b> |
| 3.1      | Uporabljene tehnologije . . . . .            | 13        |
| 3.2      | Izbira sestave prometa . . . . .             | 15        |
| 3.3      | Parametri modela . . . . .                   | 15        |
| <b>4</b> | <b>Predstavitev simulacije</b>               | <b>19</b> |
| 4.1      | Delovanje programa . . . . .                 | 19        |
| 4.2      | Izgled simulacije . . . . .                  | 20        |
| <b>5</b> | <b>Rezultati</b>                             | <b>23</b> |
| 5.1      | Skupni rezultati . . . . .                   | 23        |
| 5.2      | Rezultati po skupinah . . . . .              | 26        |
| 5.3      | Slikovna predstavitev rezultatov . . . . .   | 30        |

**6 Zaključek**

**33**

**Literatura**

**35**

# Povzetek

**Naslov:** Simuliranje prometnih zgostitev na avtocestah

**Avtor:** Špela Čopi

Čas je v svetu pomembna vrednota. Ker ljudje na cestah preživimo veliko časa, smo se v diplomski nalogi odločili analizirati in vizualno prikazati vpliv menjave voznih pasov na avtocesti na čas potovanja vozil. V ta namen smo izdelali simulacijo smernega vozišča dvopasovne avtoceste in s pomočjo simulacije pridobili podatke o časih vožnje za tipične dnevne sestave prometa. Izkazalo se je, da pravilna uporaba voznega pasu pozitivno vpliva na čas potovanja vozil. Vpliv se razlikuje glede na hitrost vozil in gostoto prometa. Čas potovanja se krajša z redčenjem prometa in z višanjem hitrosti vozil, najkrajši je pri najredkejši sestavi prometa in pri najhitrejši skupini vozil. Do optimalnih oziroma najkrajših časov potovanja pride, ko se počasnejša vozila zadržujejo pretežno na osnovnem pasu, hitrejša vozila pa na prehitevalnem voznem pasu. Poleg tega se morajo vozila učinkovito razvrščati po hitrosti. Da povzamemo, upoštevanje prometnega predpisa o menjavah pasov je priporočljivo, saj poleg varnosti in drugih prednosti, omogoča tudi krajši čas potovanja.

**Ključne besede:** avtocesta, simulacija, menjava pasov, čas vožnje.





# Abstract

**Title:** Simulating highway traffic congestions

**Author:** Špela Čopi

In nowadays fast world time is of great importance. Since people spend large amounts of time on road, we decided to analyze and visually present influence of correct lane changing on motorway on travel time. For diploma we made simulation of carriageway of two-lane motorway, with which we gained data about travel time for units of typical daily traffic. The results show that correct lane changing is relevant, moreover it decreases travel time. Impact depends on traffic density and vehicle speed. Highest decrease is noticeable at lowest traffic density unit and at group of fastest vehicles. To reach optimal (shortest) travel time most slow vehicles must be situated on default lane and most faster vehicles on over-taking lane. Furthermore, also good sorting according to speed decreases time. To sum up, it is recommended to abide lane changing rule. Beside in safety and other advantages we benefit also in smaller time consumption.

**Keywords:** highway, simulation, lane-change, travel time.



# Poglavje 1

## Uvod

V zadnjih desetletjih se je število motornih vozil in dnevnih migracij v Sloveniji občutno povečalo. Posledično se je povečala obremenjenost cest in podaljšal čas potovanja. Poleg števila vozil na čas potovanja vplivajo tudi cestna infrastruktura, kultura vožnje, lastnosti posameznih voznikov itd. Na cesti lahko najdemo tako mirne in obzirne voznike, kot tudi agresivne in egoistične. Vozniki se razlikujejo tudi glede na okolje, iz katerega prihajajo. Razlike so vidne pri upoštevanju prometnih predpisov, upoštevanju drugih voznikov v prometu, kvaliteti avtomobilov itd. Posledično se na cestah najdemo v raznovrstnih situacijah in zagatah. Nekje lahko opazujemo pretežno prost pretok vozil, drugje so pogosti prometni zastoji, lahko tudi nesreče. Vse to vpliva na čas, ki ga vozniki porabijo na cestah.

V svetu, ki venomer hiti, je čas pomembna vrednota, zato je za večino ljudi pomembno, da ga na cestah ne zapravijo preveč, še posebej, če poti opravljajo dnevno. Na določene stvari, kot so geografske značilnosti, cestna infrastruktura, vremenski pojavi in podobno, kratkoročno ne moremo vplivati. Smo pa z uvedbo prometnih predpisov zagotovili večji red in varnost na cestišču, kar krajša čas potovanja. Red omogoča večjo pretočnost vozil, varnost pa zmanjšuje število prometnih nesreč, ki so eden izmed povzročiteljev prometnih zamaškov.

Med bolj zanimive tipe cestne infrastrukture spada avtocesta. Omogoča

dinamično vožnjo in visok pretok prometa. Med vozili prihaja do veliko interakcije, zato tu srečamo veliko različnih prometnih situacij in posledično prometnih predpisov. Kot primer navedimo nekaj prometnih predpisov: prehitevanje po desni strani na avtocesti in hitri cesti ni dovoljeno; vožnja po levi strani, ko voznik ne prehiteva nobenega vozila, je prepovedana; upoštevanje varnostne razdalje, prometne signalizacije in omejitve hitrosti; prepovedana je vožnja v nasprotno smer itd. [5]. Kot že omenjeno, prometni predpisi in nenazadnje upoštevanje le-teh občutno vplivajo na čas vožnje, še posebno pri veliki količini prometa in interakcij.

Na cestah lahko opazimo veliko kršitev prometnih predpisov. Pojavi se vprašanje, kako kršitve prometnih predpisov vplivajo na čas vožnje. Za cilj diplomske naloge smo si zadali izdelavo računalniške simulacije avtoceste in z njeno pomočjo odgovoriti na zastavljeno vprašanje.

## 1.1 Motivacija in opredelitev problema

Zaradi obsežnosti vprašanja smo se omejili le na raven odsek dvopasovne avtoceste in manjše število prometnih predpisov. Tri najbolj očitne kršitve v prometu so prekoračitev hitrosti, neupoštevanje varnostne razdalje in neustrezna uporaba voznih pasov. Zaradi neprijetnih osebnih izkušenj kot teden-ski udeleženec v prometu na avtocesti sem se odločila za preučitev prometnega predpisa o pravilni uporabi osnovnega (desnega) in prehitevalnega (levega) pasu in njegovega vpliva na čas vožnje. Prehitevalni pas se uporablja zgolj za prehitevanje vozil na desnem pasu, vožnja po njem iz drugih razlogov ni dovoljena. Osnovni pas je namenjen vožnji, po njem se ne prehiteva vozil na prehitevalnem pasu.

Cilj diplomske naloge je s pomočjo računalniške simulacije vizualno in kvantitativno predstaviti vpliv nepravilne menjave voznih pasov na čas vožnje v realnih prometnih situacijah. Pri tem smo se omejili na prometne razmere v Sloveniji, in sicer na odsek med Brezovico in Vrhniko, ki spada med bolj obremenjene odseke v Sloveniji.

# Poglavje 2

## Pregled literature

Izdelava simulacije prometa na avtocesti je kompleksen problem. Sestavljen je iz zbiranja podatkov o prometu, vozilih in prometnih predpisih za izbran odsek avtoceste ter izdelave oziroma določitve matematičnih modelov za vožnjo po enem pasu in menjavo pasov. Na koncu pa še iz implementacije grafične računalniške simulacije, ki posnema vzorce premikanja vozil iz sveta okoli nas. Zaradi kompleksnosti izdelave tovrstne simulacije smo se raje kot za implementacijo povsem od začetka odločili za nadgradnjo obstoječe simulacije.

### 2.1 Avtocesta

Avtocesta je namenjena prometu motornih vozil za dolge razdalje. Sestavljena je iz dveh fizično ločenih smernih vozišč, na katerih sta po dva ali več prometnih pasov (vozni, prehitevalni, počasni, pospeševalni, zaviralni) za vsako prometno smer ter odstavni pas ali odstavnice niše, kjer se zasilno ustavljajo pokvarjena vozila.

Zaradi varnosti v prometu in varstva okolja imajo skoraj vse države splošno omejitev hitrosti od 110 do 130 km/h. Na slovenskih avtocestah velja spodnja meja 60 km/h in zgornja 130 km/h. Poleg tega je hitrost omejena glede na pogoje na cesti, gostoto in strukturo prometa ter vreme.

Vozniki morajo prilagoditi svojo vožnjo tudi glede na značilnosti vozila in tovora [7].

Avtoceste so zasnovane tako, da prenesejo gost promet. Glede na delež tovornega prometa se lahko ta vrednost spreminja. Najvišji pretok prometa je 2600 avtomobilov na uro na voznem pasu, večje obremenitve vodijo do zastojev. Kljub temu imajo avtoceste najnižji delež skupnega števila nesreč. K temu bistveno pripomorejo prometni predpisi, ločena smerna vozišča, izven-nivojska križanja z drugimi komunikacijami, varnostne ograje itd. [7]

Za simulacijo je bil izbran del slovenske dvopasovne avtoceste med Brezovico in Vrhniko proti Kopru. Omenjeni del predstavlja enega izmed bolj obremenjenih delov slovenske avtoceste, povprečno dnevno odsek prevozi okoli 60000 vozil.

## 2.2 Predhodnica simulacije

Za osnovo ciljne simulacije smo želeli preprosto in natančno simulacijo ali okolje za izdelavo simulacije, ki omogoča preprosto prirejanje pravil. Poleg tega naj bi bila simulacija dostopna za javnost. Po pregledu obstoječih simulacij in simulatorjev, kot so Simulacija za mestni promet (SUMO, angl. simulation of urban mobility), Odprtokodni simulator prometa z več modeli (MovSim, angl. multi-model open-source vehicular-traffic simulator) in PTV Vissim, smo za osnovo izbrali simulacijo avtoceste, ki je na voljo na spletnem naslovu <http://www.traffic-simulation.de/>. Simulacija ima implementirane zadovoljive matematične modele premikanja vozil. Enostavna in dobra sestava programa omogočata lažje spreminjanje in prilagajanje simulacije za pridobivanje želenih rezultatov. Poleg tega je implementirana v obliki spletne aplikacije, kar omogoča enostavno objavo ter delitev izdelka s širšo javnostjo.

## 2.3 Matematični modeli vozil

Simulacija vsebuje dva glavna matematična modela prometa. Prvi je model za prilagodljivo uravnavanje hitrosti pri vožnji na enem pasu (ACC, angl. adaptive cruise control), ki računa vzdolžno dinamiko vozil na posameznem voznem pasu (pospeševanja in zaviranja). ACC izhaja iz enopasovnega vzdolžnega modela, inteligentnega modela voznika (IDM, angl. intelligent driver model) [6]. Drugi model je model za menjavo voznih pasov, model prometa za splošno minimizacijo zaviranja ob menjavah pasov (MOBIL, angl. Minimizing overall braking induced by lane change traffic model), ki se na podlagi pospeškov izbranega in sosednjih vozil odloči za ali proti menjavi voznega pasu [3].

Skupaj modela natanko opišeta vse možne spremembe smeri in hitrosti, ki jih voznik v izbranem trenutku lahko izvrši glede na njegove želje in zmožnosti. Oba modela spadata v skupino mikroskopskih modelov prometa, ki za razliko od makroskopskih modelov gledajo na posamezno vozilo kot na samostojno enoto in ne kot na del skupine. Mikroskopski modeli posamezno enoto definirajo z lastnimi parametri, interakcije med opazovanimi enotami pa z enačbami. Kot je bilo omenjeno, so posamezne enote v našem primeru posamezna vozila. Omenimo še, da sta bila oba modela vzeta iz osnovne simulacije, nato pa nadgrajena za potrebe naše simulacije.

### 2.3.1 Model prometa na voznem pasu – IDM

Enopasovni vzdolžni inteligentni model voznika (IDM) računa pospeške vozil na voznem pasu. Pri računanju pospeškov poleg varnostne razdalje in hitrosti vozil upošteva tudi hitrost približevanja predhodnemu vozilu. To je novost pri vzdolžnih enopasovnih prometnih modelih in se odraža v realnejših pospeških kot pri starejših modelih, kot je na primer Gippsov model [6]. Na primer, ko ima predhodnje vozilo večji pospešek od opazovanega vozila, model majhne varnostne razdalje med njima ne tretira kot kritične in zavira le zmerno. Opisan način zaviranja imenujemo tudi inteligentna strategija zaviranja, ki

omogoča, da spada IDM med najenostavnejše enopasovne vzdolžne modele brez prometnih nesreč, pri katerih je obnašanje vozil verjetno in realistično v vseh možnih situacijah v prometu. Njegova prednost je tudi majhno število intuitivnih parametrov [6]. Parametri in vhodni podatki modela IDM so navedeni v tabelah 2.1 in 2.2. Izhodni podatek je *nov pospešek*  $a_i$ , izračunan glede na dano situacijo v prometu.

Tabela 2.1: Parametri modela IDM za izbrano vozilo.

| Oznaka   | Enota   | Opis  |
|----------|---------|---|
| $v_0$    | $m/s$   | <i>želena maksimalna hitrost</i>                                      |
| $a$      | $m/s^2$ | <i>največji pospešek</i>  |
| $b$      | $m/s^2$ | <i>največji pojemek pri udobni vožnji</i>                             |
| $s_0$    | $m$     | <i>najmanjša varnostna razdalja</i>                                   |
| $T$      | $s$     | <i>najmanjša varnostna razdalja</i>                                   |
| $\delta$ | 1       | <i>stopnja zmanševanja pospeška ob približevanju <math>v_0</math></i> |

Tabela 2.2: Vhodni podatki modela IDM za izbrano vozilo.

| Oznaka     | Enota   | Opis   |
|------------|---------|--|
| $v_i$      | $m/s$   | <i>hitrosti izbranega vozila</i>   |
| $v_p$      | $m/s$   | <i>hitrost predhodnega vozila</i>  |
| $\Delta v$ | $m/s$   | <i>hitrost približevanja (<math>v_i - v_p</math>, relativna hitrost)</i> |
| $s_i$      | $m/s^2$ | <i>razdalja med izbranim in predhodnim vozilom</i>                       |

Vrednosti parametrov določajo stil vožnje voznika. Z nastavitvami parametrov tako lahko dobimo voznika, ki vozi počasi in varno z velikimi varnostnimi razdaljami, ali pa voznika, ki vozi agresivno, hitro in nevarno. Obnašanje voznika določata enačbi (2.1) in (2.2):

$$a_i(s_i, v_i, \Delta v) = a \left[ 1 - \left( \frac{v_i}{v_0} \right)^\delta - \left( \frac{s^*(v_i, \Delta v)}{s_i} \right)^2 \right], \quad (2.1)$$



$$s^*(v_i, \Delta v) = s_0 + v_i T + \frac{v_i \Delta v}{2\sqrt{ab}}. \quad (2.2)$$

Prvi del enačbe (2.1),  $a[1 - (v_i/v_0)^\delta]$  predstavlja strategijo pospeševanja pri prostem pretoku prometa. Odvisen je od razmerja med želeno in dejansko hitrostjo vozila. Večja kot je razlika, večji je pospešek. Eksponent  $\delta$  določa, kako hitro se pospešek zmanjšuje ob približevanju želeni hitrosti. Kot rezultat dobimo zvezno funkcijo pospeškov z maksimalnim pospeškom  $a$  ob startu iz mirovanja ( $v_i = 0$ ) in ničnim pospeškom, ko je hitrost enaka želeni hitrosti ( $v_i = v_0$ ).

Drugi del enačbe (2.1),  $-a(s^*/s)^2$  je vedno negativen in pride v poštev, ko se izbrano vozilo približuje ali pa sledi predhodnemu vozilu. Odvisen je od razmerja med dejansko varnostno razdaljo in želeno varnostno razdaljo pri določeni hitrosti. Manjša kot je razlika med razdaljama, manjši je pospešek izbranega vozila. Želena razdalja  $s^*$  se izračuna po enačbi (2.2). Prvi del,  $s_0 + v_i T$ , opisuje mirno sledenje predhodnemu vozilu. Drugi del,  $(v_i \Delta v)/(2\sqrt{ab})$ , pa predstavlja inteligentno strategijo zaviranja, ki opisuje dinamično sledenje predhodnjemu vozilu ob približevanju [6].

### 2.3.2 Model prometa na voznem pasu – ACC

Pri prometu na enem voznem pasu zaradi natančnega računanja pospeškov ne prihaja do izrednih situacij z majhnimi varnostnimi razdaljami. Ko v model uvedemo menjave voznih pasov, pa postanejo izredne situacije mogoče. Model IDM je izdelan za računanje kontroliranega prometa na enem voznem pasu in izredno majhne varnostne razdalje tretira kot nevarne situacije. Ker deluje kot model brez nesreč, so rezultat nerealno intenzivna zaviranja. V realnem življenju zaviranja običajno niso tako intenzivna, saj se ljudje zanašamo na dejstvo, da vozilo pred nami v kratki prihodnosti ne bo brez razloga občutno spremenilo svoje hitrosti. V večini primerov je tako predvidevanje pravilno. Da bi boljše posnemali realen način odločanja v izrednih situacijah,

je bil model IDM nadgrajen v model za prilagodljivo uravnavanje hitrosti na enem voznem pasu (ACC, angl. Adaptive Cruise Control), ki računa pospeške na opisan bolj realen način.

Da povzamemo, model prometa ACC je enopasovni vzdolžni model IDM, obogaten s hevrstiko konstantnih pospeškov (CAH, angl. Constant-acceleration heuristic). CAH predstavlja enačbo za računanje pospeška  $a_{CAH}$  v situacijah z izredno majhnimi varnostnimi razdaljami. Nov pospešek vozila  $a_{CAH}$  se izračuna na podlagi optimističnega predvidevanja, da predhodno vozilo v bližnji prihodnosti ne bo nepričakovano zaviralo, zato so reakcije mirnejše [4]. Model IDM se dopolni v model ACC z enačbo (2.3):

$$a_{ACC} = \begin{cases} a_{IDM}, & \text{če } a_{IDM} \geq a_{CAH}. \\ (1 - c)a_{IDM} + c[a_{CAH} + b \tan(\frac{a_{IDM} - a_{CAH}}{b})], & \text{sicer.} \end{cases} \quad (2.3)$$

V enačbi nastopa pospešek  $a_{IDM}$  iz enačbe (2.1) in  $b$ , parameter modelov IDM in ACC. Potreben je dodaten parameter  $c$ , ki določa, kdaj se pospešek  $a_{CAH}$  upošteva. Pri vrednosti  $c = 0$  je model enak modelu IDM, medtem ko je pri vrednosti  $c = 1$  občutljivost za majhno varnostno razdaljo pri podobnih hitrostih izjemno nizka; zaviranja so manjša in daljša, vožnja pa mirnejša. Realna vrednost parametra  $c$  se nahaja na intervalu  $[0.95, 1.00]$ .

### 2.3.3 Model prometa za menjavo pasu MOBIL

Potem ko smo razvili ustrezen model vzdolžne vožnje, smo se lotili modela za menjavo voznega pasu. Za izhodišče smo vzeli model prometa za splošno minimizacijo zaviranja ob menjavi pasov (MOBIL, angl. Minimizing overall braking induced by lane change traffic model). Model sam ne predstavlja celote, ampak je dodana vrednost zelenemu enopasovnemu vzdolžnemu mikroskopskemu modelu. Ob združitvi dobimo končni model za simulacijo avtoceste. MOBIL od vzdolžnega modela sprejme podatke o pospeških izbranega in sosednjih vozil ter mu glede na atraktivnost in varnost

novega voznega pasu vrne rezultat odločitve o menjavi pasu.

Model ima 6 parametrov, prikazani so v tabeli 2.3. Posebnost modela je parameter prijaznosti, ki določa obzirnost voznika pri odločitvi o menjavi pasu. Glede na vrednost parametra prijaznosti je vožnja lahko egoistična, pri kateri voznik ne upošteva vozil okoli sebe, ali pa obzirna in je odločitev o menjavi pasu sprejeta na podlagi situacije v prometu. Za razliko od klasičnih modelov, ki temeljijo na sprejemljivi oziroma kritični varnostni razdalji za menjavo pasov, se model MOBIL za menjavo pasu odloča na podlagi pospeškov, varnostne razdalje neposredno ne upošteva [3].

Tabela 2.3: Tabela parametrov modela MOBIL.

| Oznaka                 | Enota   | Opis  |
|------------------------|---------|---|
| $b_{\text{safe}}$      | $m/s^2$ | <i>največji varen pojemek</i>                             |
| $b_{\text{max}}$       | $m/s^2$ | <i>največji mogoč pojemek</i>                             |
| $p$                    | 1       | <i>faktor prijaznosti</i>                                 |
| $\Delta a_{\text{th}}$ | $m/s^2$ | <i>prag za menjavo pasov</i>                              |
| $\Delta a_{\text{rb}}$ | $m/s^2$ | <i>utež za vožnjo po desnem voznem pasu za avtomobile</i> |
| $\Delta a_{\text{rc}}$ | $m/s^2$ | <i>utež za vožnjo po desnem voznem pasu za tovornjake</i> |

Odločanje o menjavi pasu poteka na podlagi dveh kriterijev. Najpomembnejši je kriterij varnosti, ki zagotovi, da menjava pasu poteka varno. Drugi kriterij je kriterij koristi, ki določi motivacijo za menjavo pasu.

### Varnostni kriterij

$$a_s \leq -b_{\text{safe}} \quad (2.4)$$

Varnostni kriterij, enačba (2.4), preveri, ali je menjava voznega pasu varna oziroma sploh mogoča. Zagotavlja, da po menjavi pasu pospešek sledečega vozila  $a_s$  ne preseže največjega varnega pojemka  $b_{\text{safe}}$ . Kljub enostavnosti pogoj vsebuje vse potrebne informacije modela ACC o hitrosti izbranega vozila in razdalji do potencialnega sledečega vozila za varno menjavo pasu brez nesreč.

V modelu ne pride do nesreč, dokler je največji varen pojemek  $b_{\text{safe}}$  manjši od največjega mogočega pojemka  $b_{\text{max}}$ , ki na suhih vozni površinah znaša  $9 \text{ m/s}^2$  [3].

### Kriterij koristi

Glavna motivacija za menjavo voznega pasu je v večini primerov želja po večji hitrosti in boljšemu položaju v prometu. Kriterij koristi določi, ali menjava pasu vozilu prinese dovolj izboljšave, ne da bi pri tem pretirano oviralo bližnja vozila. Glede na pravila vožnje po avtocesti obstajata dve različici omenjenega kriterija – za simetrična in asimetrična pravila menjave pasov. Kriterij koristi za simetrična pravila je namenjen avtocestam, kjer pasovi nimajo ločenih vlog – ni osnovnega pasu namenjenega vožnji in prehitevanje lahko poteka po vseh pasovih. Kriterij za asimetrična pravila na drugi strani velja za avtoceste, kjer so določeni osnovni vozni pas in prehitevalni pasovi. V našem modelu je implementiran kriterij za asimetrična pravila, saj bolj ustreza razmeram na slovenskih avtocestah. Ker je na naših avtocestah osnovni vozni pas na desni in prehitevalni na levi strani, je za našo simulacijo ustrezen kriterij, zapisan z neenačbama (2.5) in (2.6):

$$L \leftarrow R : (\tilde{a}_i - a_i) + p(\tilde{a}_s - a_s) > \Delta a_{\text{th}} - \Delta a_{\text{rb/rc}}, \quad (2.5)$$

$$L \rightarrow R : (\tilde{a}_i - a_i) + p(\tilde{a}_s - a_s) > \Delta a_{\text{th}} + \Delta a_{\text{rb/rc}}. \quad (2.6)$$

Neenačba (2.5) se upošteva ob menjavi z osnovnega na prehitevalni pas, neenačba (2.6) pa pri menjavi s prehitevalnega na osnovni pas. Razlikujeta se v predznaku parametra  $\Delta a_{\text{rb}}$  oziroma  $\Delta a_{\text{rc}}$ , ki predstavlja utež za menjavo pasu. Ker je enkrat predznačen negativno in drugič pozitivno, pride do asimetrične težnje pri menjavi pasu. Večja kot je vrednost uteži, lažje pride do menjave s prehitevalnega na osnovni vozni pas in težje do obratne menjave. Poleg parametrov  $\Delta a_{\text{rb}}$  oziroma  $\Delta a_{\text{rc}}$  v enačbah nastopa tudi parameter  $\Delta a_{\text{th}}$ , ki predstavlja prag za menjavo pasu. V primeru da je  $\Delta a_{\text{rb/rc}} = 0$ , mora biti levi del enačbe večji od parametra  $\Delta a_{\text{th}}$ , da se menjava izvede.

Leva dela neenačb sestavljata izraz  $(\tilde{a}_i - a_i)$ , ki predstavlja razliko v novih pospeških izbranega vozila ob menjavi ali brez menjave voznega pasu, in izraz  $(\tilde{a}_s - a_s)$ , ki predstavlja enako razliko v novih pospeških pri potencialnem sledečem vozilu. Ostane še posebnost modela MOBIL, to je faktor prijaznosti  $p$ . Ta določa, koliko se pri odločanju o menjavi pasu upošteva razlika v pospeških potencialnega sledečega vozila. Glede na vrednost faktorja lahko ustvarimo neobzirnega voznika, ki se odloča le na podlagi svoje koristi ( $p = 0$ ), ali voznika, ki se za menjavo pasu odloči le, če pri tem negativen vpliv na sledeče vozilo ni prevelik ( $p > 0$ ). Pri ekstremnih vrednostih dobimo voznike, ki so zavoljo tuje škode pripravljeni škodovati tudi sebi ( $p < 0$ ), ali voznike, ki pasu ne menjajo, če to kakorkoli škoduje drugim vozilom ( $1 < p$ ).

Da smo zadostili vsem asimetričnim pravilom menjave pasov, smo dodali logiko za omejevanje prehitevanja po osnovnem voznem pasu, ki velja le za vozila na osnovnem pasu, enačba (2.7):

$$a_i = \begin{cases} \min(a_i, \tilde{a}_i), & \text{če je } v_i > \tilde{v}_p > v_{crit}, \\ a_i, & \text{sicer.} \end{cases} \quad (2.7)$$

V enačbi nastopajo nov pospešek izbranega vozila na trenutnem pasu  $a_i$ , hipotetični pospešek na levem pasu  $\tilde{a}_i$  in hitrost predhodnega vozila na levem pasu  $\tilde{v}_p$ . Pogoji  $v_i > v_{crit}$  zagotavlja, da izbrano vozilo na osnovnem pasu pri tekočem prometu ne prehiteva vozil na prehitevalnem pasu, prehitevanje pri zgoščenem prometu je dovoljeno. Pogoji  $v_i > \tilde{v}_p$  pa skrbi za realno delovanje simulacije – vozila na osnovnem pasu zmanjšajo hitrost le, kadar so hitrejša od vozil na prehitevalnem pasu.

Če situacija izbranega vozila na osnovnem pasu zadošča obema pogojema, z izbiro manjšega izmed omenjenih pospeškov zagotovimo, da vozilo ne bo zapeljalo mimo predhodnega vozila na levem pasu, temveč mu bo sledilo na osnovnem pasu.



# Poglavje 3

## Metode

### 3.1 Uporabljene tehnologije

Računalništvo je eno najhitreje razvijajočih se področij, na trgu obstaja veliko moderne in učinkovite tehnologije. Ker je bila ideja izdelati simulacijo, namenjeno širši javnosti, se je izbira programskih jezikov skrčila na trenutno popularne spletne programske jezike. V tem poglavju bomo opisali, za kaj se uporabljajo v splošnem.

#### 3.1.1 HTML

Jezik za označevanje nadbesedila (HTML, angl. hyper text markup language) je označevalni jezik za izdelavo spletnih strani in predstavlja osnovo spletnega dokumenta. Poleg prikaza dokumenta v spletnem brskalniku se z njim hkrati določita tudi zgradba in semantični pomen delov dokumenta. Uporabi se ga lahko v vsakem urejevalniku besedil, saj je splošno razširjen. Zapisan je v obliki elementov HTML, ki so sestavljeni iz para značk, zapisanih v špičastih oklepajih `<p>`, `</p>`. Znotraj parov je vnešeno poljubno besedilo ali nove značke. Slednjemu rečemo tudi gnezdenje značk [9].

### 3.1.2 CSS

Kaskadne stilske podloge (CSS, angl. cascading style sheets) so podloge, predstavljene v obliki preprostega slogovnega jezika, ki skrbi za prezentacijo spletnih strani. Z njimi definiramo stil elementov HTML v smislu pravil, kako naj se ti prikažejo na strani. Določimo lahko barve, velikosti, odmike, poravnave, obrobe, pozicije itd. Prav tako lahko nadziramo tudi aktivnosti, ki jih uporabnik izvaja nad elementi strani (npr. prekritje povezave z miško). Podloge so bile razvite z namenom konsistentnega načina podajanja informacij o stilu spletnim dokumentom. Poleg definiranja pravil je pomembno izpostaviti predvsem ločitev kode za strukturo spletne strani, zapisane v jeziku HTML, od kode za njen izgled. S tem omogočimo lažje urejanje in dodajanje stilov ter poskrbimo za večjo preglednost dokumentov, temelječih na sintaksi HTML. Prav tako zmanjšamo ponavljanje kode, saj lahko množici strani omogočimo uporabo istih predlog, kar posledično bistveno zmanjša njihovo velikost [8].

### 3.1.3 JavaScript

JavaScript je objektni skriptni programski jezik, ki ga je razvilo podjetje Netscape, da bi spletnim programerjem pomagal pri ustvarjanju interaktivnih spletnih strani. JavaScript lahko sodeluje s kodo HTML in s tem poživlji stran z dinamičnim izvajanjem. Program se vgradi ali pa vključi v HTML, da opravlja naloge, ki niso mogoče na statični spletni strani, npr. odpiranje novih oken, preverjanje pravilnosti vnešenih podatkov, enostavni izračuni ipd. JavaScript podpirajo velika programska podjetja in ga kot odprtokodni jezik lahko uporablja vsakdo, ne da bi za to potreboval licenco. Podpirajo ga seveda tudi vsi novejši spletni brskalniki [10].



## 3.2 Izbira sestave prometa

Za vzorec vozil smo izbrali odsek avtoceste med Brezovico in Vrhniko v smeri Kopra. Omenjeni odsek predstavlja enega izmed bolj obremenjenih in zato tudi zanimivih odsekov na slovenskih avtocestah. Povprečno dnevno odsek prevozi okoli 60000 vozil. Podatke števca na omenjeni relaciji nam je na podlagi prošnje posredovala Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji (DARS).

Podatki obsegajo dnevne statistike prometa za celotno leto od 1. maja 2017 do 30. aprila 2018. Za vsako uro v dnevu so navedeni različni podatki. Podatki, ki so najbolj pomembni za našo simulacijo, so: sestava prometa (število manjših avtov, večjih avtov, tovornjakov, dvokolesnikov itd.), okvirna hitrostna porazdelitev, skupno število in povprečna, minimalna ter maksimalna hitrost. Iz podatkov o sestavi prometa smo vozila razdelili na lažja in težja, skupini smo poimenovali kar avtomobili in tovornjaki. Na podlagi sestav prometa tekom dneva so se izrazile štiri tipične sestave, tabela 3.1.

Tabela 3.1: Tipične sestave prometa tekom dneva.

| skupina | del dneva   | % avto. | % tovor. | povprečen pretok vozil |
|---------|-------------|---------|----------|------------------------|
| 1       | 23.00–07.00 | 67      | 33       | 396 vozil/h            |
| 2       | 07.00–15.00 | 83      | 17       | 1879 vozil/h           |
| 3       | 15.00–19.00 | 88      | 12       | 2282 vozil/h           |
| 4       | 19.00–23.00 | 89      | 11       | 1241 vozil/h           |

## 3.3 Parametri modela

V realnosti promet sestavljajo različni tipi voznikov, z izborom različnih parametrov za modela ACC in MOBIL smo tudi v simulaciji oblikovali heterogeno skupino voznikov. Vozila ločimo po parametrih, pri tem se nekoliko razlikujeta povprečji parametrov pri avtomobilih in tovornjaki.

Parametri modela ACC so porazdeljeni normalno in so med seboj korelirani. Porazdelitvi največjih zelenih hitrosti za tovornjake in avtomobile sta

bili izbrani na podlagi podatkov DARS-a pri prostem pretoku vozil. Največji pospeški in pojemki so bili okvirno določeni glede na statistične podatke o vozilih [2], varnostne razdalje glede na slovenske predpise [1], parameter  $\delta$  pa je vzet iz literature o modelu IDM [6]. Povprečne vrednosti in standardni odkloni parametrov modela ACC za avtomobile in tovornjake so našteve v tabeli 3.2.

Tabela 3.2: Parametri modela ACC.

| Oznaka   | Avto.                    | Tovor.                   | Enota   | Opis                              |
|----------|--------------------------|--------------------------|---------|-----------------------------------|
| $v_0$    | $\mathcal{N}(120, 15)$   | $\mathcal{N}(90, 3)$     | $km/h$  | <i>želena največja hitrost</i>    |
| $a$      | $\mathcal{N}(1.7, 0.3)$  | $\mathcal{N}(1.3, 0.2)$  | $m/s^2$ | <i>max pospešek</i>               |
| $b$      | $\mathcal{N}(2.3, 0.3)$  | $\mathcal{N}(1.9, 0.2)$  | $m/s^2$ | <i>max pojemek</i>                |
| $s_0$    | $\mathcal{N}(1.4, 0.18)$ | $\mathcal{N}(1.4, 0.18)$ | $m$     | <i>min varnostna razdalja</i>     |
| $T$      | $\mathcal{N}(1.5, 0.15)$ | $\mathcal{N}(1.5, 0.15)$ | $s$     | <i>min varnostna razdalja</i>     |
| $\delta$ | 4                        | 4                        | 1       | <i>stopnja manjšanja pospeška</i> |

Parametri modela MOBIL so bili izbrani na podlagi literature [3]. Izjema sta faktor prijaznosti za avtomobile, ki je določen podobno kot parametri ACC, in utež za vožnjo po osnovnem voznem pasu za avtomobile  $\Delta a_{rb}$ , ki se tekom simulacij spreminja, zato je v tabeli podana z intervalom. V tabeli manjka tudi popolno ime parametra  $\Delta a_{rc}$ , ki se imenuje utež za vožnjo po osnovnem voznem pasu za tovornjake. Vrednosti parametrov modela MOBIL so našteve v tabeli 3.3.

Tabela 3.3: Parametri modela MOBIL.

| Oznaka                 | Vrednost                 | Enota   | Opis                                    |
|------------------------|--------------------------|---------|---|
| $b_{\text{safe}}$      | 4                        | $m/s^2$ | <i>največji varen pojemek</i>           |
| $b_{\text{max}}$       | 9                        | $m/s^2$ | <i>največji mogoč pojemek</i>           |
| $\Delta a_{\text{th}}$ | 0.3                      | $m/s^2$ | <i>prag za menjavo pasov</i>            |
| $\Delta a_{\text{rc}}$ | 0.7                      | $m/s^2$ | <i>utež za tovornjake</i>               |
| $\Delta a_{\text{rb}}$ | [-1.1, 1.1]              | $m/s^2$ | <i>utež za avtomobile</i>               |
| $p_{\text{rc}}$        | 1                        | 1       | <i>faktor prijaznosti za tovornjake</i> |
| $p_{\text{rb}}$        | $\mathcal{N}(0.75, 0.2)$ | 1       | <i>faktor prijaznosti za avtomobile</i> |



# Poglavje 4

## Predstavitev simulacije

### 4.1 Delovanje programa

V naši implementaciji simulacije prometa jezika HTML in CSS določata strukturo in stil spletne strani, logika pa je zapisana v skriptah jezika JavaScript. Najbolj pomembne skripte so: glavna skripta *carriageway.js*, skripta z modeli prometa *models.js*, skripta za distribucijo parametrov *gaussianRandom.js* in skripta z logiko za premikanje in izris vozil *road.js*.

Glavna skripta najprej poskrbi za inicializacijo programa. Tu so inicializirane globalne spremenljivke, ki določajo parametre modelov, lastnosti ceste, dimenzije vozil, testne spremenljivke itd. Glavni namen te skripte je poganjanje simulacij. Vsebuje zanko, ki skrbi za neskončno poganjanje sklopa kode na sliki 4.1. Vsaka iteracija omenjenega sklopa predstavlja moment stanja na cestišču, v katerem se posodobijo statistike vozil in izriše stanje na smernem vozišču avtoceste.

Skripta *road.js* vsebuje tabelo vozil, v kateri so za vsako vozilo shranjene njegove statistike. Program s prvim klicem vsakemu vozilu v tabeli posodobi lastni indeks in indekse sosednjih vozil (levo in desno predhodnje ter levo in desno sledeče vozilo). Nato posodobi čas zadnje menjave pasu. V tretjem koraku vozilom izračuna nove pospeške glede na njihovo hitrost, hitrost predhodnjega vozila in predhodnjega vozila na prehitevalnem pasu,

Slika 4.1: Del ponavljajoče se kode v glavni skripti.

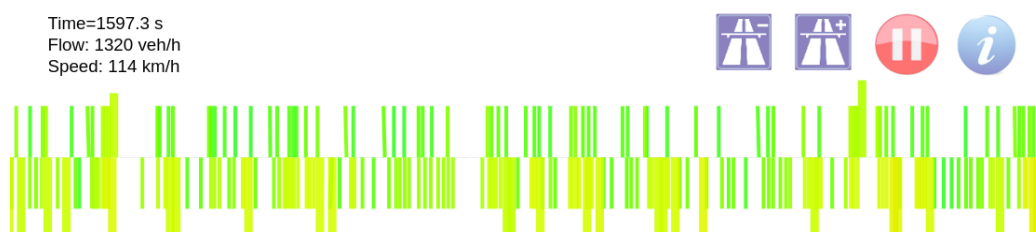
```
mainroad.updateEnvironment ();
mainroad.updateLastLCtimes (dt );
mainroad.calcAccelerationsPotato ();
mainroad.changeLanes ();
mainroad.updateSpeedPositions ();
mainroad.updateBCdownPotato ();
mainroad.updateBCupPotato (qIn , dt , truckFrac );
mainroad.drawVehiclesPotato (carImg , truckImg , ... );
```

če le-ta obstaja. Z upoštevanjem predhodnjega vozila na prehitevalnem pasu je izpolnjen prometni predpis, ki prepoveduje prehitevanje po desnem pasu, enačba (2.7). V četrtem koraku program preveri možnosti menjave pasov na levi ali desni sosednji pas. V primeru da ciljni pas obstaja in da od zadnje menjave pasu izbranega in sosednjih vozil ni minilo premalo časa, model MOBIL določi, ali se menjava izvede. V primeru menjave se vozilu določi nov voznik, hitrost, pospešek in ostale parametre. Pri menjavi voznega pasu se lokacija vozila spreminja zvezno, pri izrisu je dodana tudi rotacija vozila. Sledi posodobitev hitrosti in vzdolžne lokacije na cesti. Predzadnji korak preverja, ali je prišlo vozilo do konca ceste. V primeru da je prišlo, program po potrebi shrani statistiko vozila za namen končnega izpisa in vozilo izbriše iz tabele vozil. V zadnjem koraku program glede na želen tok prometa dodaja nova vozila in njim pripadajoče parametre.

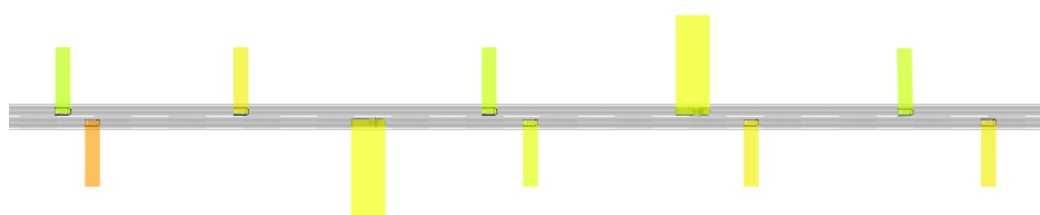
## 4.2 Izgled simulacije

Ko program posodobi lokacije in hitrosti vseh vozil, se začne zadnji korak izrisa prometa in prometne infrastrukture; v našem primeru ravne ceste, avtomobilov in tovornjakov. Simulacija prikazuje smerno vozišče z dvema prometnima pasovoma, na katerih se nahajajo vozila. Vsakemu vozilu je dodan

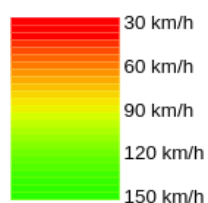
barvni kvadrat, ki predstavlja njegovo hitrost. Tako kot v dejanskem svetu so tudi v naših simulacijah avtomobili manjši od tovornjakov, posledično je tudi barvni kvadrat, ki določa hitrost vozila, pri avtomobilih manjši, sliki 4.2 in 4.3. Rdeča barva predstavlja najpočasnejšo hitrost in prikazuje zastoje, zelena pa višjo hitrost, kot je razvidno iz barvne lestvice na sliki 4.4.



Slika 4.2: Izgled simulacije prometa pri pretoku 1240 vozil/uro, 12 % tovornjakov.



Slika 4.3: Izgled simulacije prometa pri veliki povečavi.



Slika 4.4: Barvna lestvica hitrosti.





# Poglavje 5

## Rezultati

Izmed štirih glavnih sestav prometa iz tabele 3.1 smo izbrali 3 tipične, ki jih tekom dneva lahko opazujemo na avtocesti. Za vzorec smo vzeli 6000 vozil in 20 kilometrov enosmernega vozišča avtoceste. Za vsako sestavo prometa smo preverili, kako pravilna menjava voznih pasov vpliva na čas potovanja vozil. Da bi izničili vpliv naključnih dogodkov, smo simulacijo 8-krat pognali za vsako izmed izbranih sestav prometa za vrednosti parametra  $a_{rb}$  med  $-1,1$  in  $1,1$ . Pri vsaki ponovitvi smo beležili čas vožnje ter delež vožnje na prehitevalnem pasu.

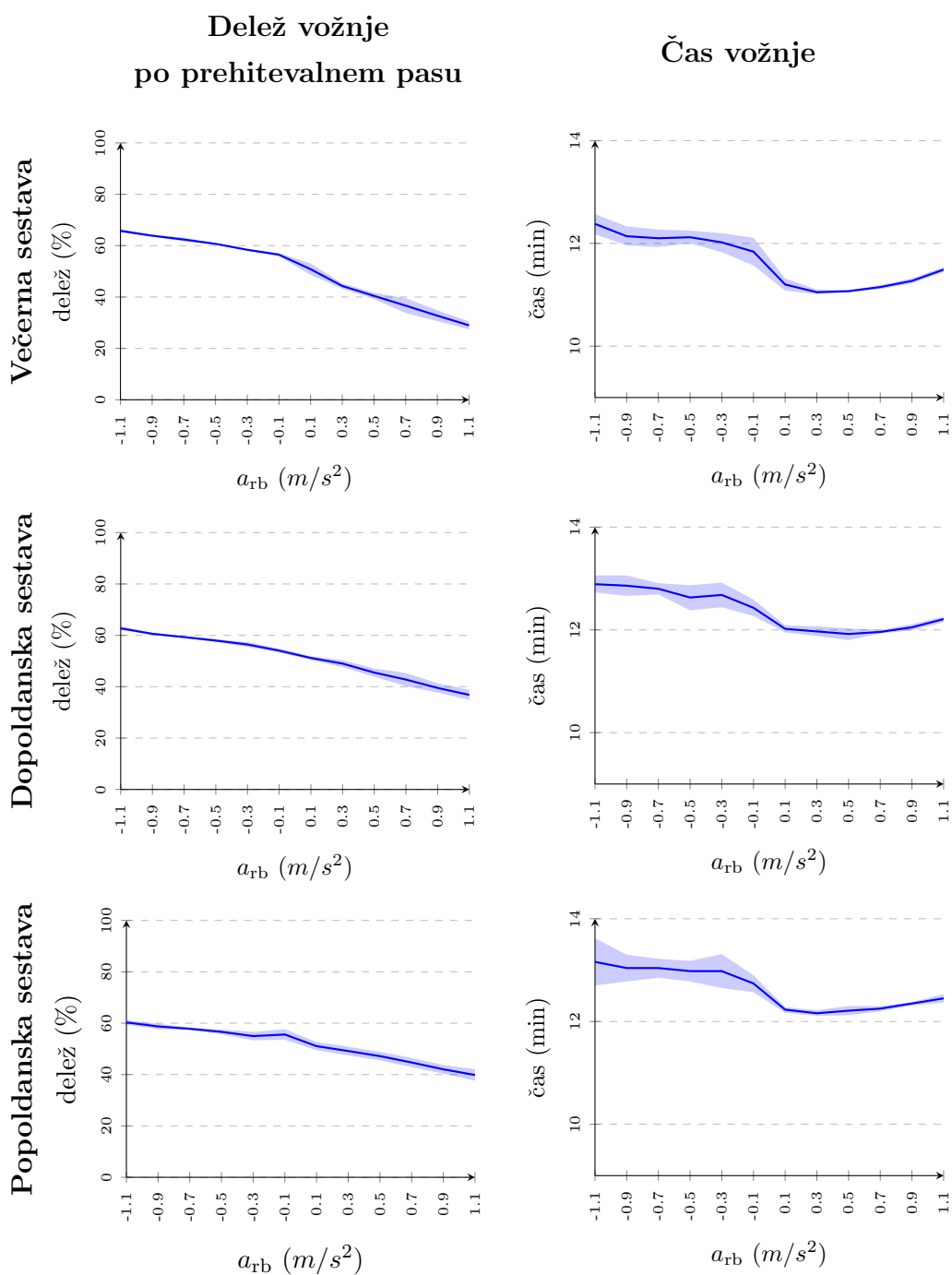
### 5.1 Skupni rezultati

Najprej opazimo, da parameter  $a_{rb}$  neposredno vpliva na delež vozil na prehitevalnem pasu. Na sliki 5.1 je prikazano, kako z naraščanjem vrednosti uteži  $a_{rb}$  delež vozil na prehitevalnem pasu upada. Pri večerni sestavi prometa je padec največji in najhitrejši, in sicer s 65,76 % na 28,97 %. Sledi mu dopoldanska sestava prometa, delež pade z 62,73 % na 36,81 %. Najmanjši in najpočasnejši padec je opazen pri popoldanski sestavi, ko je promet najgostejši, s 60,29 % na 39,83 %.

Rezultati časov potovanj so bolj razgibani. Ko vrednost uteži  $a_{rb}$  med  $-1,1$  in  $0,5$  narašča, čas potovanja postopno pada. Največji in najbolj očiten

padec je pri večerni sestavi prometa, ko je promet najbolj tekoč, čas potovanja pade za 1 minuto in 19 sekund. Sledita dopoldanska in popoldanska sestava, kjer padec znaša 58 sekund z razliko 0,4 sekunde. Predpostavljamo, da je padec podoben zaradi majhne razlike v gostoti prometa, promet je v obeh primerih precej zgoščen. Kljub temu so časi pri popoldanski sestavi povprečno za 15 sekund daljši kot pri redkejši dopoldanski sestavi.

Ko se vrednost uteži  $a_{rb}$  nahaja med 0,1 in 0,7, so časi potovanja najkrajši. Takrat se pri večerni sestavi prometa na prehitevalnem pasu nahaja med 36,64 in 50,84 % vozil, pri dopoldanski med 42,91 in 50,70 % vozil in pri popoldanski sestavi (ob konici prometa) med 44,69 in 51,06 % vozil. Optimalna vrednost uteži  $a_{rb}$  je pri večerni in popoldanski sestavi 0,3, pri dopoldanski pa 0,5. Pri večerni sestavi je takrat na prehitevalnem pasu 40,33 % vozil, povprečen čas poti pa je 11 minut in 3 sekunde. Pri dopoldanski sestavi se na prehitevalnem pasu nahaja 45,50 % vozil, čas vožnje znaša 11 minut in 55 sekund. Pri popoldanski sestavi, ko je promet najgostejši, se na prehitevalnem pasu nahaja 49,15 % vozil, ki za pot porabijo povprečno 12 minut in 10 sekund.



Slika 5.1: Grafi povprečnih deležev in časov poti za posamezne sestave prometa.

## 5.2 Rezultati po skupinah

Za boljšo predstavo rezultatov si pogledjmo še odvisnost časa potovanja od uteži  $a_{rb}$  pri posameznih hitrostnih skupinah vozil, slika 5.2. Vozila smo razdelili v 5 skupin glede na zelene hitrosti, predstavljene v tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Hitrostne skupine vozil (legenda grafov).

| Oznaka                                       | Delež | Opis   |
|--|-------|--|
| <span style="color: red;">■</span> v1        | 0.12  | Vozila z zeleno hitrostjo do 90 <i>km/h</i> .                      |
| <span style="color: orange;">■</span> v2     | 0.21  | Vozila z zeleno hitrostjo med 90 <i>km/h</i> in 110 <i>km/h</i> .  |
| <span style="color: yellow;">■</span> v3     | 0.42  | Vozila z zeleno hitrostjo med 110 <i>km/h</i> in 130 <i>km/h</i> . |
| <span style="color: lightgreen;">■</span> v4 | 0.22  | Vozila z zeleno hitrostjo med 130 <i>km/h</i> in 150 <i>km/h</i> . |
| <span style="color: green;">■</span> v5      | 0.02  | Vozila z zeleno hitrostjo nad 150 <i>km/h</i> .                    |

Najpočasnejša skupina v1 je sestavljena pretežno iz tovornjakov. Z utežjo  $a_{rc} = 0.7$  in faktorjem prijaznosti  $p_{rc} = 1$  se tovornjaki pretežno zadržujejo na osnovnem pasu. Menjavo na prehitevalni pas izvršijo le, ko je pri tem vpliv na sledeče vozilo majhen. Posledično je delež vožnje po prehitevalnem pasu najpočasnejše skupine vedno zelo nizek, zgolj 4.78 %. Ker vozila vedno vozijo blizu zelene hitrosti, se čas poti ne spreminja veliko. Znaša povprečno 13 minut in 55 sekund, s povprečnim dvigom za 14 sekund. Razlike med sestavami niso velike, največji dvig lahko opazimo pri popoldanski sestavi, pri kateri je čas potovanja tudi najdaljši.

Več sprememb je opaznih pri ostalih skupinah. Pri negativnih vrednostih uteži  $a_{rb}$  velik delež ostalih vozil vozi po prehitevalnem pasu. Pri skupini v2 delež znaša povprečno 54.03 %, pri skupini v3 70.32 %, pri skupini v4 71.14 % in pri skupini v5 66.30 %. Delež vožnje po prehitevalnem pasu z višanjem vrednosti uteži pada, pri tem pri počasnejših skupinah v2 in v3 bolj očitno kot pri hitrejših dveh. Večja kot je zelena hitrost skupine, večji je delež vozil skupine na prehitevalnem pasu. Do tega pride zaradi manjše obzirnosti in večje motiviranosti hitrejših vozil. Tu dodajmo opombo, da v simulaciji to ne drži v vseh primerih, zaradi večje motiviranosti za menjavo

pasu hitra vozila izvršijo veliko neuporabnih menjav pasu, kar niža delež vožnje na prehitevalnem pasu. To je posebej izrazito pri večernem prometu pri najnižjih vrednostih uteži. Opazimo tudi, da je pri redkejši sestavi procent vozil na prehitevalnem pasu višji.

Pri negativnih vrednostih uteži  $a_{rb}$  se počasna vozila nahajajo na obeh voznih pasovih, kot smo omenili se tovornjaki nahajajo pretežno na osnovnem pasu, večina avtomobilov pa zaradi negativne uteži na prehitevalnem pasu. Zaradi oteženih menjav pasu in slabega razvrščanja po hitrosti so tudi povprečne hitrosti nižje in čas potovanja daljši.

Do večjih sprememb pride, ko se utež  $a_{rb}$  nahaja med -0.3 in 0.1. Do hitrega padca deleža vozil na prehitevalnem pasu pride pri skupinah v2 in v3. Vzrok je zmanjšana razlika med dejansko in želeno hitrostjo, vozila nimajo več motivacije za menjavo pasu in ostajajo na osnovnem pasu, razvrščanje vozil po hitrosti s tem postane lažje in čas potovanja posledično krajši. Padeč deleža vozil na prehitevalnem pasu je najhitrejši in najbolj izrazit pri večernem prometu in bolj postopen pri gostejših prometnih režimih. Vozila iz skupin v4 in v5 pri vrednostih uteži  $a_{rb}$  med -0.3 in 0.1 ostajajo na prehitevalnem pasu. Pri večernem prometu se delež rahlo dvigne, pri drugih dveh pa se ohranja.

Pri pozitivnih vrednostih parametra  $a_{rb}$  vozila dosegajo želeno hitrost, se razvrščajo in umikajo na osnovni pas. Dvigne se hitrost in skrajša čas potovanja vozil. Z naraščanjem parametra  $a_{rb}$  čas potovanja pade do najnižjih vrednosti, nato pa se začne počasi spet dvigati. Optimalne vrednosti uteži, ko je čas potovanja najkrajši, so za posamezne skupine zapisane v tabeli 5.2. Spust in dvig sta najbolj izrazita pri skupinah v2 in v3, še posebej pri večernem prometu.

Do ponovnega dviga časa potovanja pri visokih vrednostih uteži pride zaradi visoke težnje po vožnji po osnovnem pasu in vse večje razlike v hitrostih voznih pasov, kar otežuje razvrščanje vozil po hitrosti.

Razlike med najkrajšim in najdaljšim časom potovanja po skupinah: skupina v2 - 1 minuta in 5 sekund, skupina v3 - 1 minuta in 24 sekund, skupina

Tabela 5.2: Tabela optimalnih vrednosti uteži  $a_{rb}$  za posamezne skupine.

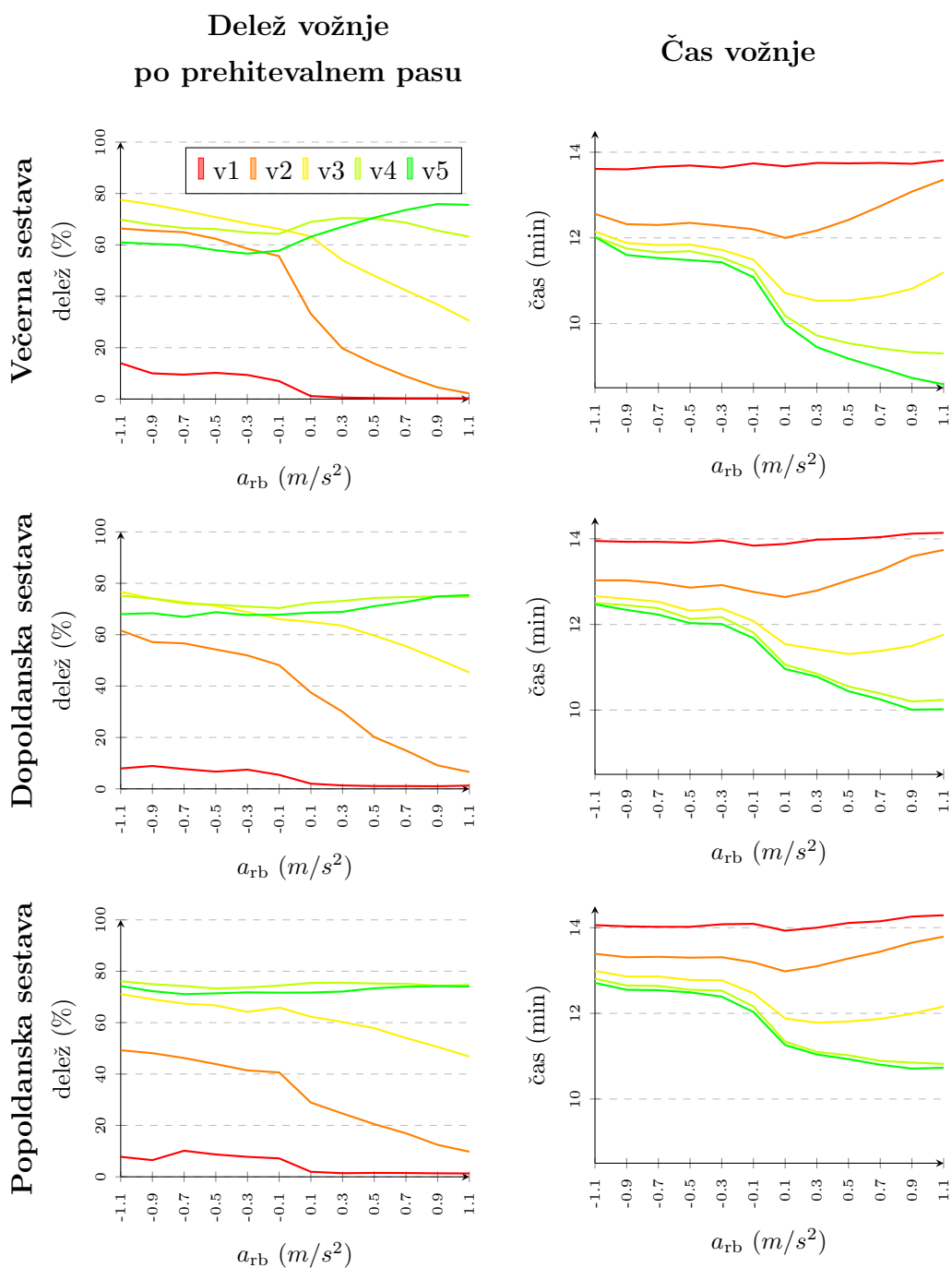
| Skupina | Utež $a_{right}$ | Max hitrost ( $km/h$ ) | Min čas (min) |
|---------|------------------|------------------------|---------------|
| ■ v1    | -0.9             | 88.42                  | 13.85         |
| ■ v2    | 0.1              | 100.35                 | 12.54         |
| ■ v3    | 0.3              | 114.73                 | 11.21         |
| ■ v4    | 0.9              | 127.51                 | 10.07         |
| ■ v5    | 1.1              | 136.46                 | 9.77          |

Tabela 5.3: Delež vožnje skupin po prehitevalnem pasu pri optimalnih prometnih razmerah,  $a_{rb} = 0.5$  (povprečeno po sestavah prometa).

| Skupina | Večerna | Dopoldanska | Popoldanska |
|---------|---------|-------------|-------------|
| ■ v1    | 0.58 %  | 1.09 %      | 1.41 %      |
| ■ v2    | 19.73 % | 20.15 %     | 24.63 %     |
| ■ v3    | 54.07 % | 59.64 %     | 60.21 %     |
| ■ v4    | 70.44 % | 74.30 %     | 75.52 %     |
| ■ v5    | 67.03 % | 71.09 %     | 72.11 %     |

v4 - 2 minuti in 20 sekund in skupina v5 - 2 minuti in 38 sekund. Če povzamemo, večja kot je zelena hitrost vozila, večja je razlika v času. Velja tudi, da redkejša kot je sestava prometa, večje so razlike v času potovanja.

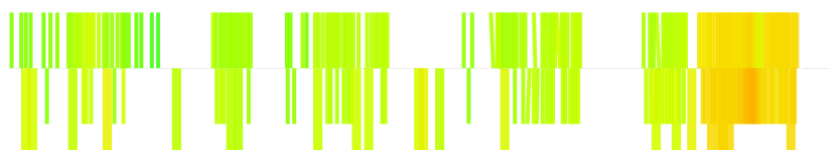
Poglejmo si še dogajanje po skupinah pri povprečno optimalnem stanju v prometu. Do optimalne situacije pride, ko se počasna polovica vozil večino časa nahaja na osnovnem pasu, hitrejša vozila pa večino časa na prehitevalnem pasu, tabela 5.3. Pri branju tabele je treba upoštevati velikosti skupin. Ker so počasnejše skupine nekoliko večje, so pri skupini v3 procenti večji od 50 %. V naših simulacijah optimalno stanje dosežemo pri vrednosti uteži  $a_{rb}$  0,5 oziroma 0,3.



Slika 5.2: Grafi deležev in časov poti glede na vrednost uteži  $a_{rb}$  za vse sestave. Barvna lestvica predstavlja posamezne hitrostne skupine.

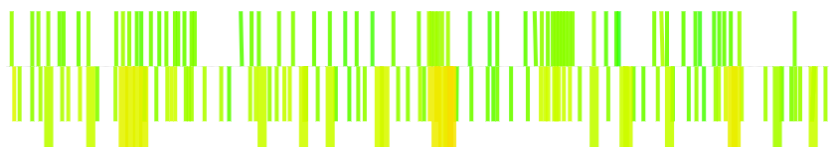
### 5.3 Slikovna predstavitev rezultatov

Za boljšo predstavo o rezultatih smo spodaj nanizali slike, ki prikazujejo stanje v danem trenutku pri večerni sestavi prometa. Na sliki 5.3 lahko opazimo, da se večina vozil nahaja na prehitevalnem pasu, zaradi oteženega razvrščanja pa je prišlo na koncu odseka do zastoja, ki je oranžno obarvan.



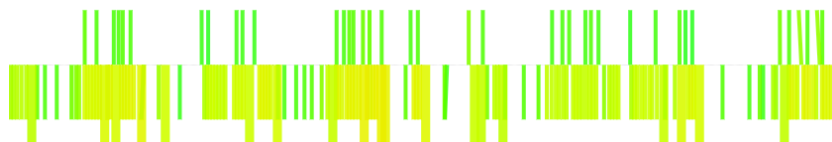
Slika 5.3: Simulacija večernega prometa (1200 vozil/h) pri vrednosti uteži  $a_{rb} = -1.1$

Slika 5.4 prikazuje stanje, ko avtomobili nimajo preferenčnega voznega pasu, rezultat je enakomerna obremenitev obeh pasov. Po barvah vozil je razvidno, da je promet hitrejši kot v prejšnjem primeru. Slika 5.5 prikazuje promet, ko se večina avtomobilov nahaja na osnovnem voznem pasu, promet je spet nekoliko počasnejši. Zadnja slika, slika 5.6, pa prikazuje promet pri optimalni vrednosti uteži  $a_{rb} = 0.5$ , ko je povprečni čas potovanja vozil najkrajši.

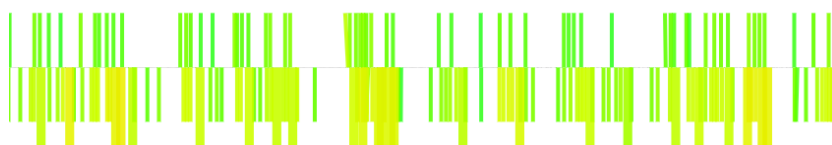


Slika 5.4: Simulacija večernega prometa (1200 vozil/h) pri vrednosti uteži  $a_{rb} = 0$





Slika 5.5: Simulacija prometa (1200 vozil/h) pri vrednosti uteži  $a_{tb} = 1.1$



Slika 5.6: Simulacija večernega prometa (1200 vozil/h) pri optimalni vrednosti uteži  $a_{RB} = 0.5$



# Poglavje 6

## Zaključek

V nalogi smo s pomočjo simulacije preverjali vpliv prometnega predpisa o menjavi pasov na čas potovanja. Prometni predpis določa, da je osnovni vozni pas namenjen vožnji, prehitevalni pas pa je namenjen prehitevanju počasnejših vozil. Prehitevanje po osnovnem pasu ni dovoljeno. V nalogi smo preverjali in primerjali manjše število sestav prometa, ki predstavljajo sliko prometa tekom dneva in se razlikujejo v gostoti in deležu tovornih vozil.

Iz analize podatkov simulacije lahko potrdimo, da vrednosti uteži  $a_{rb}$  oziroma delež vožnje vozil po prehitevalnem pasu vpliva na čas potovanja vozil, in sicer se upoštevanje omenjenega prometnega predpisa pozitivno obrestuje. Vpliv je najbolj izrazit pri večerni sestavi prometa s pretokom 1200 vozil na uro, od tega 12 % tovornjakov, razlika je 1 minuta in 19 sekund na 20 kilometrih avtoceste. Da je razlika največja pri sestavi z najredkejšim prometom, je pričakovano, saj pridejo tam zelene hitrosti najbolj do izraza. Poleg tega se je pri vseh sestavah izkazalo, da hitrejša kot je vozilo, bolj se menjave pasu poznajo na njegovem času potovanja. Pri najpočasnejši skupini se čas poti povprečno skrajša za 14 sekund, pri najhitrejši skupini pa za 2 minuti in 38 sekund na 20 kilometrov avtoceste.

Pri tem je pomembno, kakšna je zelena hitrost vozil, ki se nahajajo na različnih voznih pasovih. Do optimalnih vrednosti pride, ko se na prehitevalnem pasu nahajajo pretežno hitrejša vozila, na osnovnem voznem pasu

pa pretežno počasnejša vozila. Procenti vožnje po prehitevalnem pasu se z zasedenostjo cestišča pričakovano dvigajo, a je pri vseh sestavah razmerje med vozili podobno. Za odgovor na zanimivo vprašanje, ali so razmerja pri vseh gostotah podobna, bi bile potrebne dodatne simulacije.

Pri analizi se je izrazila tudi teza, da obzirnost vozil pri pravilni menjavi pasov še dodatno skrajša čas potovanja, saj pospeši sortiranje vozil po hitrosti. Do te predpostavke smo prišli s primerjanjem prometa pri negativnih in pri pozitivnih vrednostih uteži. V simulaciji so parametri nastavljeni tako, da so počasnejši vozniki bolj obzirni do drugih kot hitrejši vozniki.

Zaključimo lahko, da je upoštevanje prometnega predpisa o menjavi pasov dobra odločitev, saj poleg večanja varnosti v prometu krajša tudi čas potovanja. Koliko časa bomo pri tem pridobili, je sicer odvisno od naše zelene hitrosti, gostote prometa in vedenja drugih voznikov. Manjša kot je naša hitrost, bolj je zaželeno, da se umikamo na osnovni vozni pas in upoštevamo druge voznike. Poleg že omenjenih prednosti pa smo pri tem tudi zgled drugim voznikom in vzdržujemo varno, organizirano in prijetno vožnjo, kar je vsem v interesu.

# Literatura

- [1] Avtocesta. Dosegljivo: <http://www.varna-voznja.si/avtocesta>. [Vir: Zakon o varnosti cestnega prometa, <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina?urlid=2006133&stevilka=5573>].
- [2] 0 to 100 km/h kph list - car figures and specs. Dosegljivo: <http://www.autosnout.com/0-100kph-Times-List.php>. [Dostopano 3. 7. 2018].
- [3] Martin Treiber Arne Kesting and Dirk Helbing. General lane-changing model mobil for car-following models. *Transportation Research Record*, pages 86–94, 1999. Dosegljivo: [http://www.akesting.de/download/MOBIL\\_TRR\\_2007.pdf](http://www.akesting.de/download/MOBIL_TRR_2007.pdf).
- [4] Martin Treiber Arne Kesting and Dirk Helbing. Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, pages 4585–4605, december 2010.
- [5] Policija Ministrstvo za notranje zadeve. Vožnja po avtocesti in hitri cesti. Dosegljivo: <https://www.policija.si/index.php/preventiva/63767-vonja-po-avtocesti-in-cesti-rezervirani-za-motorna-vozila>. [Dostopano 9. 7. 2018].
- [6] M.Treiber and A.Kesting. Car-following models based on driving strategies. In *Traffic Flow Dynamics*, pages 181–204. Springer, 2013.

- [7] Wikipedia. Avtocesta. Dosegljivo: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Avtocesta>. [Dostopano 7. 7. 2018].
- [8] Css. Dosegljivo: <https://sl.wikipedia.org/wiki/CSS>. [Dostopano 7. 7. 2018].
- [9] Html. Dosegljivo: <https://sl.wikipedia.org/wiki/HTML>. [Dostopano 7. 7. 2018].
- [10] Javascrpit. Dosegljivo: <https://sl.wikipedia.org/wiki/JavaScript>. [Dostopano 7. 7. 2018].