



VPLIV GOSTOTE PROMETA IN NAČINA VOŽNJE NA PROMETNI TOK TER IZPUSTE CO₂

COBISS 1.01

DOI: 10.4312/DZOB1160

Izvleček

Namen prispevka je na primeru 1500 m dolge ceste z enim pasom proučiti značilnosti prometa in ugotoviti, kako na pretok in izpuste ogljikovega dioksida (CO₂) vplivajo gostota vozil, omejitev hitrosti in način vožnje. V raziskavi je uporabljen mikroskopski prometni model celični avtomat (v nadaljevanju CA), imenovan razširjeni model LAI, ki vsebuje nove funkcije in je nadgrajen za izračun izpustov. Glede na rezultate prometnih simulacij so z modelom, ki so ga predstavili Panis, Broekx in Liu (2006), izračunani izpusti CO₂ na prevožen kilometer. Rezultati kažejo, da je pri največji dovoljeni hitrosti 70 km/h največji pretok 2122 vozil/uro dosežen pri gostoti 0,25 vozila/celico. Med gostotama 0,22 in 0,28 vozila/celico je prometni tok v sinhronizirani fazi, v kateri zaradi medsebojnega delovanja vozil povprečna hitrost pade. Pri višjih gostotah nastajajo zastoji, povprečna hitrost še naprej pada, povečuje se količina izpustov. Najvišja dovoljena hitrost vpliva na izpuste CO₂ le pri nižjih gostotah, pri višjih pa nanje precej bolj vpliva stopnja pospeška. Menimo, da bi bilo v času prometnih zgostitev koristno zmanjšati gostoto prometa, da bi dosegli čim bolj optimalen pretok in zmanjšali negativne vplive na okolje, na primer s spodbujanjem občasnega dela od doma, uporabe javnega prevoza in potovanja pred ali po predvidenih prometnih konicah.

Ključne besede: prometni tok, izpusti CO₂, mikroskopski modeli prometnega toka, emisijski modeli, celični avtomat, razširjeni model LAI

*Oddelek za geografijo, Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani, Aškerčeva cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija (Na jami 16, SI-1000 Ljubljana, Slovenija)

**Katedra za mehaniko, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Jamova 508, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-pošta: ar7918@student.uni-lj.si (andrej.rigler1@gmail.com), goran.turk@fgg.uni-lj.si
ORCID: 0000-0002-4596-3594 (G. Turk)

1 UVOD

Avtomobilski promet je vir različnih težav, kot so prometne nesreče in onesnaževanje zraka. Leta 2016 je prometni sektor prispeval približno 25 % svetovnih izpustov CO₂, kar je 71 % več kot leta 1990. Onesnaženost zraka z drobnimi delci lahko tudi poveča tveganje pljučnega raka in smrtnost zaradi zapletov s srcem ter pljuči (Escap, 2019; Hoek in sod., 2002; Marzoug in sod., 2022). Vpliv prometa na onesnaženost zraka je še posebej velik tik ob prometnicah. Onesnaženost zaradi prometa namreč hitro upada z oddaljenostjo od cest (Ogrin, 2007; Strle in sod., 2020). Na onesnaženost močno vplivajo lega in vremenske razmere (Glojek in sod., 2019). Promet je tudi porabnik prostora. V mestih, kjer je vse večji problem tudi hrup, predstavlja veliko obremenitev mirujoči promet (Ogrin, 2018).

De Vlieger, Keukeleere in Kretzschmar (2000) so pokazali, da lahko zmernejši način vožnje zmanjša izpuste v prometu in obratno. Ježek in sod. so ugotovili, da četrtnina osebnih vozil na dizelski pogon, ki najbolj onesnažujejo okolje, prispeva 63 % in 47 % izpustov črnega ogljika oziroma NO_x (Ježek in sod., 2015).

Pred začetkom uvajanja ukrepov za zmanjšanje izpustov je nujno najprej oceniti izpuste. Obstajata dva glavna pristopa za ocenjevanje izpustov: makroskopski in mikroskopski. Prvi se nanaša na oceno izpustov v širšem merilu, drugi pa na oceno izpustov vsakega vozila posebej (Ntziachristos in sod., 2009; Panis, Broekx, Liu, 2006; Rakha in sod., 2000). Mikroskopski modeli računajo izpuste iz prometa s pomočjo podatkov o emisijskih faktorjih (EF) vozil in njihovi aktivnosti. Gre za pristop »od spodaj navzgor«. Poznamo še drug način računanja izpustov iz prometa, in sicer »od zgoraj navzdol«, pri čemer so prispevki virov določeni na podlagi *in-situ* meritev koncentracij različnih sledil v zunanjem zraku. Ježek (2015) je z zasledovalno metodo merila emisijske faktorje črnega ogljika in NO_x za vozila različnih kategorij.

Čeprav so mikroskopski modeli zelo natančni, niso primerni za uporabo na velikih območjih, ker za oceno izpustov potrebujejo podatke o vsaki sekundi vožnje vozila, kar je računsko zahteven postopek. Zato so za velika omrežja računsko bolj učinkoviti makroskopski modeli, ki pa so običajno manj natančni v primerjavi z mikroskopskimi metodami. Podatke za makroskopsko modeliranje, kot sta povprečna hitrost in gostota omrežja, je relativno enostavno zbrati s pomočjo prometnih števecv in detektorjev (Halakoo, Yang, Abdulsattar, 2023). Mikroskopske prometne modele je treba uporabljati v kombinaciji z mikroskopskimi simulacijami prometa, ki modelirajo premikanje posameznih vozil in s tem realistično predstavijo gibanje prometnega toka. Med temi je dobra možnost za modeliranje prometa tip modelov celični avtomat (CA) (Guzman in sod., 2018).

Z uporabo modelov CA lahko opišemo številne fizikalne sisteme in procese. Izkazali so se za uporabne ne samo pri modeliranju prometnih tokov, ampak tudi v številnih različnih aplikacijah, na primer pri modeliranju širjenja gozdnih požarov, rasti prebivalstva, vedenja pešcev itd. V geografiji se uporabljajo za simulacije

sprememb rabe tal, saj zmorejo povezati interakcije različnih dejavnikov v prostoru (Pinto, Antunes, Roca, 2021; Xu, Xing Zhu, Liu, 2023). Ker modeli CA računajo količino pojava v prostoru, lahko s prometnimi modeli CA merimo vpliv križišč, zožitev cest, omejitev hitrosti ali drugih značilnosti in dejavnikov prometa kjerkoli na proučevanem območju.

Model CA je sestavljen iz n-dimenzionalne mreže ali niza celic, pri čemer se različne vrednosti vseh celic hkrati posodabljaajo v posameznih časovnih korakih glede na vrednosti sosednjih celic v predhodnem časovnem koraku (Karafyllidis, Thanailakis, 1998; Maerivoet, De Moor, 2005). V primeru nadgrajenega razširjenega modela LAI se v vsakem časovnem koraku posodabljaajo hitrost, pospešek in prevožena pot vseh vozil naenkrat.

V primeru prometnih modelov CA je cesta razdeljena v celice določene velikosti. Pri enoceličnih modelih je vsaka celica lahko prazna ali vsebuje vozilo. Čas predstavljajo diskretni časovni koraki (v smislu, da čas ni zvezna spremenljivka). Glede na različna pravila se stanje celic v sistemu spreminja v času oziroma v časovnih korakih, tako da se posnema gibanje vozil (Maerivoet, De Moor, 2005).

Prometni modeli CA so postali priljubljeni pri modeliranju prometnih tokov, ker učinkovito in hitro delujejo v računalniških simulacijah, kjer lahko s pomočjo preprostejšega nabora pravil in nizkih računskih zahtev izvajajo obsežne simulacije. Prav tako lahko posnemajo realno vožnjo in upoštevajo psihološke lastnosti voznikov (Benjamin, Johnson, 1996).

Prvi deterministični CA model prometnega toka je znan kot Wolframovo pravilo 184, ki predstavlja spreminjanje osrednje celice v času glede na lastnosti obeh sosednjih celic. V fizikalnem smislu rezultat pravila 184 predstavlja gibanje vozila, ki se premakne za en korak v desno, če je prostor prazen, oziroma ostane na mestu, če je prostor zaseden (Wolfram, 1983).

Leta 1992 sta Nagel in Schreckenberg (NaSch) izdelala prvi stohastični prometni model CA, pri katerem je eno od pravil stohastično. Z uporabo naključnega zaviranja lahko model simulira nastajanje prometnih zastojev. V modelu NaSch, v katerem je najvišja dovoljena hitrost 5, lahko vozila pospešijo le za eno stopnjo, če imajo prostor (Nagel, Schreckenberg, 1992).

Prometni modeli CA so se razvijali skozi čas, ko so avtorji uvajali nova pravila za pospeševanje, vzdrževanje razdalje in postopek posodabljanja (Barlovic in sod., 1998; Benjamin, Johnson, 1996; Knospe in sod., 2000; Takayasu, Takayasu, 1993). K pomembnemu napredku so prispevali Kerner, Klenov in Wolf (2005), ki so v svoj model KKW CA vključili sinhronizacijsko razdaljo. Ko vozilo pripelje v območje interakcije vozila spredaj (tj. sinhronizacijske razdalje), poskuša svojo hitrost prilagoditi hitrosti tega vozila (Kerner, Klenov, Wolf, 2002).

Leta 2010 sta Larraga in Alvarez-Icaza nadgradila pristop CA z modelom LAI (gre za krajšavo imen avtorjev, Larraga in Alvarez-Icaza), ki simulira prost pretok, zgoščen promet, sinhroniziran tok in druge kompleksne prostorsko-časovne vzorce. Hkrati se

model izogiba kompleksnim pravilom, značilnim za modele, ki temeljijo na modelu KKW. Pri modelu LAI vozila prilagajajo hitrost glede na razdaljo do vozil pred njimi. Odziv voznika temelji na analizi varnosti, ki je sestavljena iz njegovega reakcijskega časa, hitrosti vozila, hitrosti vozila spredaj in razdalje med njima (Larraga, Alvarez-Icaza, 2010). Model LAI je bil pozneje izboljššan in razširjen (Guzman in sod., 2015; Li in sod., 2016).

Poznamo tudi različne mikroskopske modele za računanje izpustov. Za uporabo modela, ki so ga leta 2018 razvili Panis, Broekx in Liu (model PBL) za izračun izpustov PM, VOC, CO₂ in NO_x za mestni promet, potrebujemo zgolj podatke o hitrosti in stopnji pospeška v vsakem trenutku. Koeficienti v funkciji so pridobljeni iz empiričnih opazovanj. Pri nekaterih modelih potrebujemo za računanje izpustov še druge podatke, na primer moč motorja, naklon ceste ali obremenitev vozila (Quaasdorff in sod., 2022).

Številni avtorji so uporabili kombinacijo modelov CA in mikroskopskih modelov izpustov. Pan in sod. (2018) so proučevali povezavo med pretokom prometa, porabljen količino goriva, izpusti in razpršitvijo delcev na enem pasu. Za prometne simulacije so uporabili model NaSch CA, za izračun izpustov delcev pa model PBL.

Marzoug in sod. (2018) so proučevali prometne izpuste na semaforiziranih križiščih. Za gibanje vozil so uporabili model NaSch CA in model menjave voznih pasov. Za opis prometa v križiščih so uporabili algoritme delovanja semaforjev, za izračun izpustov CO₂, PM, VOC in NO_x pa model PBL.

Xue in sod. (2020) so za simulacijo prometnega toka na enosmernem pasu pri odprtih mejnih pogojih uporabili trifazni model KKW CA. Porabo goriva vozil so proučevali z metodo, ki so jo razvili Treiber, Kesting in Thiemann (2007) in pri kateri se uporablja Newtonovo formulo za izračun mehanske moči kot funkcije pospeška in hitrosti.

Rezultati študij so pokazali, da je vpliv omejitve hitrosti na različne izpuste in porabo goriva pri manj zgoščenem prometu drugačen kot pri prometnih konicah. Podobno velja za trajanje zelene luči na semaforjih. Z zgostitvijo prometa se povečujeta količina izpustov in poraba goriva.

Namen članka je na primeru 1500 m dolge ceste z enim pasom proučiti značilnosti prometa in ugotoviti, kako na pretok ter izpuste CO₂ vplivajo gostota vozil, omejitve hitrosti ter način vožnje. Cesta je namišljena in ne predstavlja dejanskega odseka ceste. Z razumevanjem dinamike prometnega toka lažje sprejmemo ukrepe na obremenjenih cestnih odsekih (na primer omejitev hitrosti, širitev ali zožitev cest, preusmeritev prometa), ki pripomorejo k zmanjšanju pretoka in obremenitev prometa v okolju. V slovenski geografski literaturi in nasploh slovenski znanstveni literaturi nismo zasledili uporabe modelov CA. Prav tako v slovenski literaturi nismo zasledili izdelave prometnega simulatorja, ne da bi za to uporabili že izdelana orodja. Model CA je primeren za raziskavo, ker je z njim mogoče številsko ovrednotiti določen pojav v času in prostoru. Na področju prometa je uporaben za izračun hitrosti, pospeškov

in lokacij vozil v časovni enoti. V kombinaciji z emisijskim modelom je primeren za računanje izpustov. Hkrati je razmeroma preprost za izdelavo lastnega simulatorja. Z modelom CA je mogoče izvesti prometne simulacije na razmeroma velikih območjih. Razširjeni model CA LAI zaradi uporabe teorije kinematike in realnih stopenj pospeškov ter pojemkov posnema dejansko stanje prometa (Guzman in sod., 2018).

2 METODOLOGIJA

2.1 Prometni model

V raziskavi smo uporabili razširjeni model LAI, ki smo ga nadgradili za izračun izpustov. Model vrste CA izvira iz modela LAI in njegovih pravil izogibanja trkom. Pri obeh modelih v vsakem časovnem koraku izračunamo varnostno razdaljo zasledovanega vozila oziroma vozila zadaj glede na hitrost zasledovanega vozila, hitrost vozila spredaj, sposobnost zasilnega zaviranja obeh vozil in razdaljo med obema voziloma. Glede na izračunano medsebojno razdaljo se zasledovano vozilo odloči, ali bo pospešilo, ohranilo svojo hitrost, upočasnilo ali zavrlo v sili.

Avtorji so v novi različici dodali dve novosti:

1. različne vrednosti pospeševanja in zaviranja za različna vozila,
2. pospeševanje vozil temelji na enakomernem pospešenem gibanju namesto na impulzivnem pospešenem gibanju, značilnem za večino modelov CA.

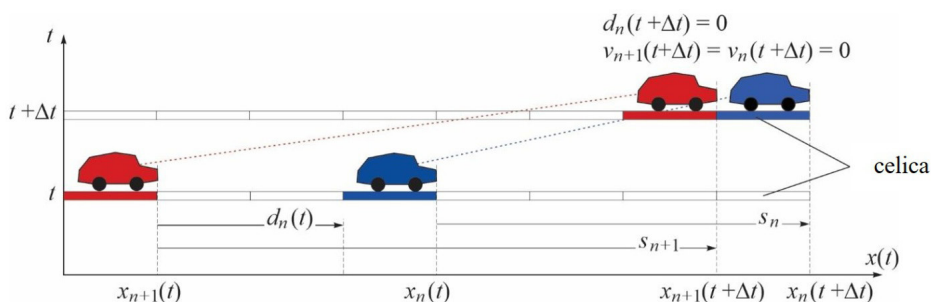
Razširjeni model LAI prav tako omogoča izračun treh varnostnih razdalj med vozilom zadaj in vozilom spredaj, ki imata lahko različne ali enake vozne lastnosti. Glede na izračunane razdalje nato vozilo zadaj sprejme odločitev za pospešek (ali pojemek oziroma zaviranje) glede na najslabši možni scenarij, pri katerem vozilo spredaj zavre v sili. Razširjeni model je bolj v skladu z realnim prometom, saj uporablja realne stopnje pospeševanja/pojemanja. Pri tem se vozila gladko približujejo počasnejšim vozilom ali stoječim vozilom. Model temelji na preprostih pravilih kinematike in njenih parametrov, določenih glede na položaje in hitrosti sosednjih vozil. Izhaja iz enakomerno pospešenega gibanja, kjer je stanje vozila v času opisano na naslednji način:

$$x_n(t) = x_{n_0} + v_{n_0}t + \frac{1}{2}a_nt^2 \quad (1)$$

$$v_n(t) = v_{n_0} + a_nt \quad (2)$$

Pri tem x_n in v_n označujeta položaj in hitrost vozila n , t je čas, x_{n_0} in v_{n_0} sta začetni položaj in hitrost vozila, a_n pa je pospešek. Vrednosti parametrov za pospešek, pojemek in človeški reakcijski čas izhajajo iz opazovanj prometa (Guzman in sod., 2018). Model zato reši pojav nenadnih pojemkov in kompleksnosti, kar je značilno za modele CA. Rezultati simulacij kažejo, da lahko razširjeni model LAI posnema empirične ugotovitve (Guzman in sod., 2018).

Slika 1: Shematični diagram za računanje varne razdalje.



Razširjeni model LAI je verjetnostni model CA, sestavljen iz N vozil, ki se premikajo v eno smer na enodimenzionalni mreži L celic. Vsaka celica je bodisi prazna bodisi jo zaseda eno samo vozilo. Njihove hitrosti so vrednosti, ki se spreminjajo od 0 do $v_{\max}$, kar označuje največjo hitrost vozila. Na tem mestu omenimo razlike med razširjenim modelom LAI in različico, uporabljeno v tej raziskavi. V prvem modelu lahko vozilo zasede več kot eno celico, v drugem pa eno samo celico. Dolžina celice v novem modelu je 7,5 m, kar je velikost mesta, ki ga zasede posamezen avtomobil v zastoju (Nagel, Schreckenberg, 1992). Pri razširjenem modelu LAI znaša dolžina celice 1 m. Za razliko od razširjenega modela LAI v novi različici vrednosti hitrosti niso cele vrednosti, ampak realna števila. Položaj vozila v novem modelu predstavlja dve vrednosti, ki označujeta položaj sprednjega odbijača vozila. Prva vrednost je njegov natančen položaj na cestišču, druga pa položaj, ki sovpada z zaporedno številko celice. Druga vrednost se uporablja za izračun izpustov. Vozilo zasede eno samo celico v celoti le na začetku, ko zapelje na cestišče. Pozneje ni več v eni sami celici, temveč v dveh celicah. Zato vrednost celice predstavlja celico, v katero je vstopilo vozilo v celoti. Število tako sovpada z večkratnikom velikosti celice. Na primer, če ima vozilo položaj 7,5 m, to pomeni, da se je ravno pojavilo na mreži celic in zasedlo prvo celico. Na položaju 14 m še vedno zaseda prvo celico, pri čemer je ostanek 6,5 m. Na položaju 15 m je zasedlo drugo celico. Ni možnosti, da bi se dve vozili pojavili v isti celici, ker mora biti med njima minimalna razdalja velikosti celice. Nadgrajeni model vključuje dve časovni spremenljivki. Spremenljivka t_r , ki predstavlja reakcijski čas voznika, se uporablja za izračun varnostnih razdalj za določitev novega pospeška vozila in je enaka 1 s, kar ustreza človeški reakciji (Guzman in sod., 2018).

Na podlagi tega pospeška druga časovna spremenljivka ustreza časovnemu koraku Δt , ki se uporablja za izračun nove hitrosti in položaja vozila. Za razliko od t_r spremenljivka Δt ni odvisna od načina vožnje. To je druga razlika glede na razširjeni model LAI, ki ne vključuje časovnih spremenljivk, saj sta časovni korak in reakcijski čas vedno 1.

2.2 Pravila za posodabljanje

Korak 1:

Izračun varnostne razdalje. V prvem koraku se določi najmanjša varnostna razdalja za vozila d_{accn} , d_{keepn} ali d_{decn} , pri čemer spremenljivke predstavljajo potrebne razdalje med vozilom spredaj n in vozilom zadaj $n+1$ v primeru, da želi slednje pospešiti, obdržati hitrost ali zavreti (Guzman in sod., 2018).

Korak 2:

Počasno pospeševanje. Glede na hitrost vozila v_{n+1} je določen parameter stohastičnega šuma R_a .

$$R_a = \min \left(R_d, R_0 + v_{n+1} \frac{R_d - R_0}{v_s} \right) \quad (3)$$

Pri tem parameter stohastičnega šuma R_a označuje verjetnost, da bo vozilo pospešilo, kar je odvisno od njegove hitrosti. Predpostavlja se, da bo vozilo, katerega hitrost je manjša od v_s v prejšnjem časovnem koraku, pospešilo z manjšo verjetnostjo kot preostala vozila v gibanju $v_{n+1} > v_s$, kar pomeni, da morajo počasna vozila čakati dlje, preden lahko nadaljujejo z vožnjo. Vrednost parametra $R_a (< 1)$ linearno interpolira med R_0 in R_d ($R_0 < R_d$), če je hitrost v_{n+1} manjša od hitrosti v_s , ki v našem primeru znaša 8 m/s (Larraga, Alvarez-Icaza, 2010). Vrednosti vseh parametrov so definirane v poglavju 3.1.

Korak 3:

Odločitev.

Glede na medsebojno razdaljo $d_n(t)$ zasledujočega vozila in vozila spredaj, ki se primerja z izračunanimi varnostnimi razdaljami v koraku 1, je izračunan pospešek zasledovanega vozila. Upoštewane so tudi verjetnosti pospeševanja (korak 2).

Korak 3a:

Pospeševanje.

če $d_{accn} \leq d_n(t)$ potem

$$a_{n+1}(t) = \begin{cases} a & \text{če } \text{randf}() \leq R_a, \\ 0 & \text{sicer} \end{cases}$$

pri čemer $a_{n+1}(t)$ označuje stopnjo pospeška, ki ga uporabi zasledovano vozilo v naslednjem časovnem koraku Δt .

Korak 3b:
Naključno ustavljanje.

če $d_{\text{keep}_n} \leq d_n(t) < d_{\text{acc}_n}$ potem

$$a_{n+1}(t) = \begin{cases} -a & \text{če } \text{randf}() \leq R_s, \\ 0 & \text{potem} \end{cases}$$

pri čemer R_s predstavlja verjetnost, da bo vozilo zavrlo kljub temu, da ima dovolj prostora, da ohranja hitrost.

Korak 3c:
Zaviranje.

če $d_{\text{dec}_n} \leq d_n(t) < d_{\text{keep}_n}$ potem

$$a_{n+1}(t) = -a$$

Korak 3d:
Zaviranje v sili.

če $d_n(t) < d_{\text{dec}_n}$ potem

$$a_{n+1}(t) = -a_{\text{max}}$$

pri čemer a_{max} predstavlja stopnjo najvišjega pospeška, ki ga uporabi vozilo, ko zavira v sili.

Korak 4:
Akcija.

$$v_{n+1}(t + \Delta t) = \min(\max(0, v_{n+1}(t) + a_{n+1}(t)\Delta t), v_{\text{max}})$$

pri čemer $v_{n+1}(t)$ predstavlja hitrost zasledovanega vozila v časovnem koraku t , $v_{n+1}(t + \Delta t)$ pa hitrost zasledovanega vozila v naslednjem časovnem koraku $t + \Delta t$

Korak 5:
Premik vozila.

če $(a_{n+1}(t) \geq 0)$ potem

$$x_{n+1}(t + \Delta t) = x_{n+1}(t) + v_{n+1}(t)\Delta t + \frac{a_{n+1}(t)\Delta t^2}{2}$$

pri čemer $x_{n+1}(t+\Delta t)$ označuje položaj zasledovanega vozila v naslednjem časovnem koraku $t+\Delta t$

če ($a_{n+1}(t + \Delta t) < 0$) potem

$$x_{n+1}(t + \Delta t) = x_{n+1}(t) + v_{n+1}(t)\Delta t_s + \frac{a_{n+1}(t)\Delta t_s^2}{2}$$

pri čemer Δt_s označuje časovno razliko med t in časom, ko se vozilo ustavi. Če je ta vrednost manjša kot Δt , potem se mora uporabiti Δt_s . Pravilo je sledeče:

$$\Delta t_s = \min \left(\Delta t, \text{abs} \left(\frac{v_{n+1}(t)}{a_{n+1}(t)} \right) \right)$$

(Guzman in sod., 2018).

2.3 Emisijski model

V raziskavi uporabljamo emisijski model PBL (Panis, Broekx, Liu, 2006), ki omogoča izračun izpustov CO₂ vsakega vozila v vsakem časovnem koraku glede na njegov pospešek in trenutno hitrost. Panis, Broekx in Liu (2006) so s 95-odstotno zanesljivostjo dokazali, da je model primeren za izračun prometnih izpustov v mestih. Na podlagi empiričnih meritev in z uporabo tehnike nelinearne multiple regresije so razvili naslednjo splošno emisijsko funkcijo:

$$E_n(t) = \max(E_0, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)) \quad (4)$$

Pri tem je $E_n(t)$ trenutna količina izpustov (g/s) vozila. Spremenljivki $v_n(t)$ in $a_n(t)$ predstavljata trenutno hitrost in pospešek vozila n v času t . E_0 je spodnja meja izpustov (g/s), določena za vsako vrsto vozila in vrsto onesnaževala, f_1 do f_6 pa so emisijske konstante, specifične za vsako vrsto vozila in onesnaževala. Model lahko oceni količino izpustov CO₂, NO_x, VOC in PM (Panis, Broekx, Liu, 2006). Model PBL se uporablja v številnih študijah in je tudi privzeti emisijski model v simulatorju prometa Aimsun (Halakoo, Yang, Abdulsattar, 2023). Emisijske konstante modela PBL za izpuste CO₂ za bencinska in dizelska osebna vozila so navedene v preglednici 1.

Preglednica 1: Parametri za enačbo 4.

Onesna- ževalo	Tip vozila	E_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
CO ₂	Bencin- ski avto	0	$5,53 \cdot 10^{-1}$	$1,61 \cdot 10^{-1}$	$-2,89 \cdot 10^{-3}$	$2,66 \cdot 10^{-1}$	$5,11 \cdot 10^{-1}$	$1,83 \cdot 10^{-1}$
CO ₂	Dizelski avto	0	$3,24 \cdot 10^{-1}$	$8,59 \cdot 10^{-1}$	$4,96 \cdot 10^{-3}$	$-5,86 \cdot 10^{-1}$	$4,48 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$

2.4 Uporaba metod CA in PLB v geografiji

Metoda prometnega modela CA v kombinaciji z mikroskopskim emisijskim mode-
lom, kot je model PBL, je uporabna v geografski znanosti v prvi vrsti zato, ker lahko
meri različne pojave kjerkoli v prostoru proučevanja. Z ugotovitvami je potem mogo-
če razumeti pojave v prometu in sprejeti ukrepe, ki bi na primer pripomogli k zmanj-
šanju njegovih negativnih vplivov na okolje. V primeru raziskave, ki smo jo izvedli,
metoda proučuje pretok, povprečno hitrost in izpuste CO₂ na 1500 m dolgi enosmer-
ni cesti v odvisnosti od različnih parametrov, gostote, najvišje dovoljene hitrosti in
agresivnosti vožnje. Metoda omogoča tudi merjenje drugih izpustov na specifičnih
lokacijah, na primer v križiščih, ob semaforjih, v conah za pešce ali večjih sistemih
cest oziroma ulic. Z ugotavljanjem pretoka na različnih lokacijah lahko ocenjujemo
tudi druge učinke prometa na okolje in se lažje odločamo za sprejetje določenih ukre-
pov, koristnih za izboljšanje učinkovitosti prometa.

2.5 Nastavitve modela in parametrov

Simulacije so bile narejene v programskem okolju Mathematica, različica 13.2. Model
simulira promet na enopasovni krožni cesti s periodičnimi robnimi pogoji. Vsaka
celica predstavlja 7,5 m, pri čemer je ena celica zasedena z največ enim avtomobilom.
Določitev velikosti celice izhaja iz velikosti območja, ki ga zasede avto v zastoju (Na-
gel, Schreckenberg, 1992).

Vsak časovni korak znaša $\Delta t = 1$ s. Dolžina ceste $L = 200$ sovpada z dolžino
ceste 1500 m. V začetnem stanju model naključno razporedi vozila po cestišču z zač-
etno hitrostjo, ki je prav tako naključno izbrana med vrednostma 0 in najvišjo možno
hitrostjo glede na prostor, ki ga ima vozilo pred seboj. Za izračun izpustov CO₂ so
bile določene različne vrednosti za v_{max} . Glede na oceno varnostne razdalje, odvis-
no od sosednjih vozil, se določi najvišja hitrost za vsako vozilo z uporabo kvadratne
enačbe glede na predpogoj, da v začetnem stanju vozila ne pospešujejo. Na ta način
so hitrosti vozil določene na način, da v naslednjem časovnem koraku ne bo prišlo do

nesreče. Gostota vozil na cestišču znaša ρ =vozilo/celica. Njihove hitrosti in položaji se posodablajo po pravilih, opisanih v poglavju o metodologiji. Parametri modela za stohastični del so nastavljeni na enake vrednosti kot v razširjenem modelu LAI, $R_d = 1$, $R_0 = 1$, $v_s = 8$ m/s in $R_s = 0,01$. Parameter v_s določa, da lahko samo vozila s hitrostjo, manjšo od 8 m/s, pospešujejo z zamikom (Guzman in sod., 2018).

Določitev stopnje pospeševanja in pojemanja je bila bolj kompleksna naloga. Na podlagi empiričnih opazovanj so Guzman in sod. (2018) uporabili vrednost 8 m/s² za največji pojemek in 4 m/s² za pospešek. V drugem delu študije, v katerem so simulirali heterogeni tok, so uporabili te vrednosti za navadna, drugačne pa za tovorna vozila. Največji pojemek slednjih znaša 4 m/s², pospešek pa 2 m/s².

Zeng in sod. (2023) so za stopnjo pospeška uporabili vrednost 3 m/s². Feng, Liu in Liang (2023) so v svoji raziskavi upoštevali različne načine vožnje. Po zbranih podatkih na odseku ceste, kjer je največja hitrost znašala 73,21 km/h, so ugotovili, da je 20 % voznikov agresivnih s stopnjo pospeševanja in zaviranja 4 m/s², 20 % voznikov je umirjenih s stopnjo pospeševanja in zaviranja 1 m/s², 60 % voznikov pa ima zmeren način vožnje s stopnjo pospeševanja in zaviranja 2 m/s².

Glede na zbrane podatke smo določili stopnjo pospeševanja za voznike, pri čemer smo tako kot Feng in sod. (2023) sklepali, da je 20 % voznikov agresivnih, 60 % voznikov zmernih, 20 % voznikov pa umirjenih. Agresivni vozniki pospešujejo s stopnjo pospeška 4 m/s², umirjeni z 2 m/s², zmerni vozniki pa s 3 m/s². Stopnja največjega pojemka agresivnih in zmernih voznikov je 8 m/s², stopnja največjega pojemka umirjenih voznikov pa 4 m/s² (preglednica 2).

V nasprotju z Guzman in sod. (2018) in Feng, Liu in Liang (2023) model v tej raziskavi omogoča agresivnim voznikom, da pospešijo z nižjo stopnjo, če nimajo dovolj prostora za pospeševanje z najvišjo stopnjo. Po drugi strani pa enako kot v primeru Guzman in sod. (2018) vozila zavirajo le z eno stopnjo poleg stopnje zaviranja v sili. To agresivnim voznikom omogoča, da vozijo dlje časa z višjo hitrostjo in začnejo zavirati pozneje, ko so bližje vozilu spredaj. Rezultati, s katerimi sta bila narejena diagrama pretok-gostota in hitrost-gostota, so bili pridobljeni s simulacijami dolgimi 400 sekund oziroma časovnih korakov. Za vsako gostoto od 0 do 1 smo izvedli 10 simulacij in določili srednjo vrednost. Za izračun izpustov CO₂ so bile določene različne kombinacije stopenj pospeškov in pojemkov.

Preglednica 2: Parametri načinov vožnje.

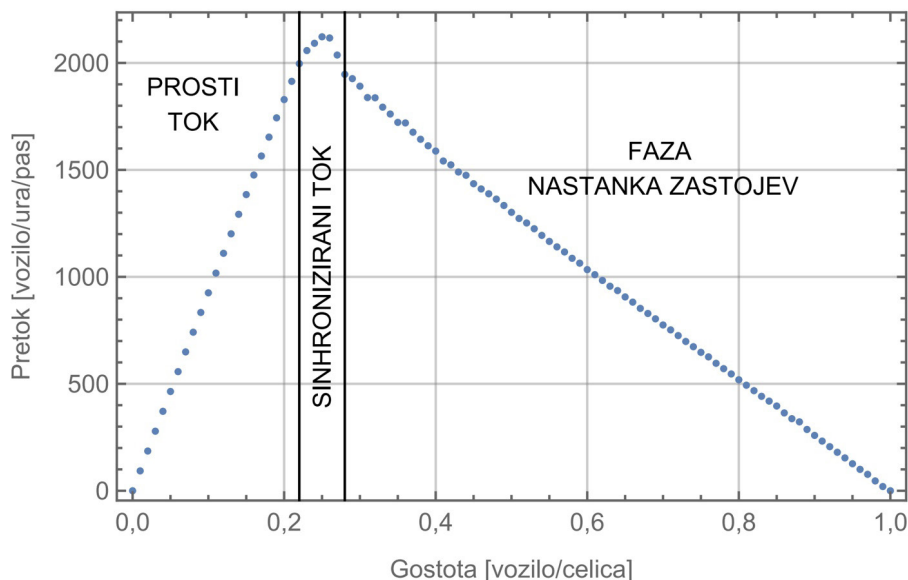
Način vožnje	Delež vozil	Največji pospešek	Pojemek	Pojemek v sili
Agresivni način	20 %	4 m/s ²	4 m/s ²	8 m/s ²
Zmerni način	60 %	3 m/s ²	3 m/s ²	8 m/s ²
Umirjeni način	20 %	2 m/s ²	2 m/s ²	4 m/s ²

3 REZULTATI SIMULACIJ IN DISKUSIJA

3.1 Analiza temeljnih diagramov

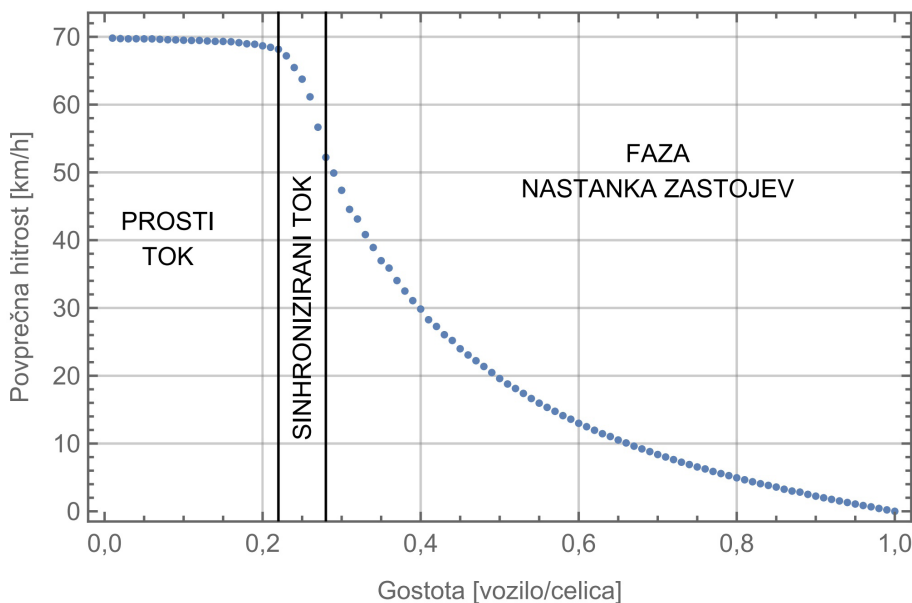
Na sliki 2 je predstavljeno razmerje pretok-gostota nadgrajenega razširjenega modela LAI, ki predstavlja enega izmed temeljnih diagramov analize prometa. Kot je razvidno, pretok doseže največjo vrednost 2122 vozil/uro pri optimalni gostoti 0,25 vozila/celico, nad katero začne upadati. Pri gostoti 0,28 pride do nenadnega padca prometnega toka, ko se ta spremeni v fazo nastanka zastojev. Sprememba iz faze prostega toka v fazo sinhroniziranega toka se zgodi pri gostoti 0,22, ko začne tudi hitrost padati zaradi več medsebojnih interakcij med vozili, a še ne pride do zastojev.

Slika 2: Diagram pretok-gostota je pridobljen iz simulacij, ki so bile izvedene v nadgrajenem razširjenem modelu LAI, pri čemer je bila določena najvišja dovoljena hitrost 70 km/h.



Sinhronizirani tok pri najvišji dovoljeni hitrosti 70 km/h nastane med gostotama $0,22 < \rho < 0,28$ vozila/celico. Na sliki 3 je predstavljeno razmerje med hitrostjo in gostoto nadgrajenega razširjenega modela LAI. Kot je razvidno, na območju sinhroniziranega toka povprečna hitrost vozil pade, in sicer za 16 km/h glede na najvišjo dovoljeno hitrost. Hkrati je njihova hitrost še vedno stabilna (slika 4b), vozila pa vzdržujejo enako medsebojno razdaljo na celotnem cestnem odseku.

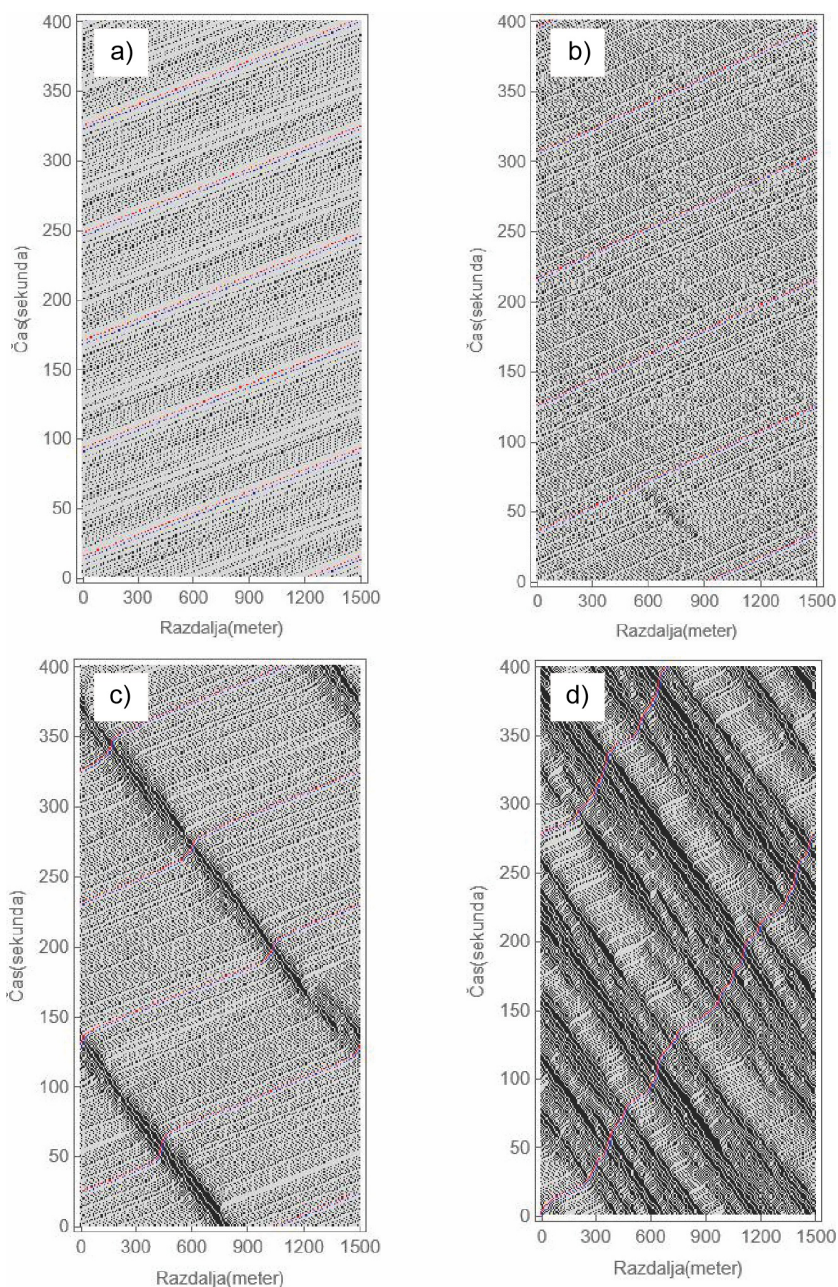
Slika 3: Diagram hitrost-gostota je pridobljen iz simulacij, ki so bile izvedene v nadgrajenem razširjenem modelu LAI, pri čemer je bila določena najvišja dovoljena hitrost 70 km/h.



Ko gostota preseže 0,27 vozila/celico, pride s povečanjem gostote le za 0,01 do točke preloma. Faza sinhroniziranega toka preide v fazo nastanka zastojev (slika 4c). Pri gostoti 0,28 vozila/celico hitrost vozil ni več enakomerna po celotnem cestnem odseku, saj se začnejo pojavljati zastoji. Zato, da vozila pri gostoti 0,28 vozila/celico ohranjajo varnostno razdaljo, njihova povprečna hitrost spet znatno pade (slika 3).

Pri nadgrajenem razširjenem modelu LAI je pretok prometa pri najvišji dovoljeni hitrosti 115 km/h največji pri nižji gostoti 0,21 vozila/celico, kar je logično, saj vožnja z višjo hitrostjo zahteva ohranjanje večje varnostne razdalje med vozili. Zato imajo pri višjih hitrostih vozila dovolj prostora med seboj le pri nižjih gostotah. Vendar pa nadgrajeni razširjeni model LAI doseže največji pretok prometa pri višjih gostotah, kot to velja za originalni razširjeni model LAI (Guzman in sod., 2017). Menimo, da je to posledica prilagojenega pospeševanja, ki jo omogoča nadgrajeni razširjeni model LAI in ki agresivnim voznikom, za katere je značilno, da močnejše pospešujejo, omogoča pospeševanje z manjšim pospeškom, če nimajo dovolj prostora za uporabo največjega pospeška. Originalni model LAI te možnosti nima.

Slika 4 prikazuje različne vrste prometnih razmer, prosti tok, sinhronizirani tok in fazo nastanka zastojev. Pike v vodoravnih vrsticah predstavljajo položaje vozil, ki se v času premikajo proti desni, medtem ko posamezen stolpec pik predstavlja prisotnost



Slika 4: Prostorsko-časovni diagram različnih faz prometa, prostega toka (4a), sinhroniziranega toka (4b) in nastanka zastojev (4c in 4d) pri najvišji dovoljeni hitrosti 70 km/h.

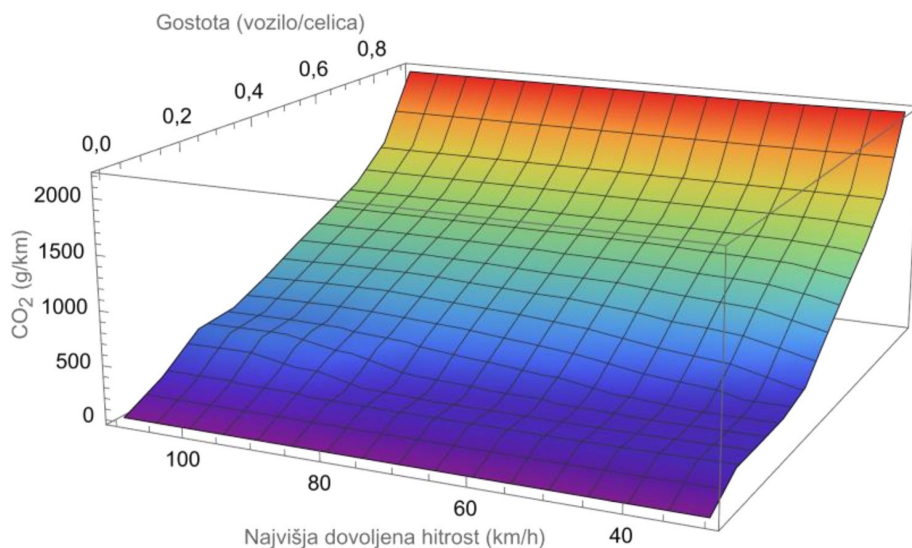
vozila na posamezni celici v času. Celica je lahko zasedena z vozilom ali prazna. Rdeče in modre pike predstavljajo položaj dveh primerov vozil v času (glej tudi sliko 1).

Na sliki 4a so prikazana vozila z višjimi hitrostmi, ko na cesti ni zastojev in lahko dosežejo najvišjo hitrost. Ko je na cesti gneča, hitrost vozila pade na nič. Na slikah 4c in 4d so prikazana vozila v fazi zastojev. Do sinhroniziranega prometnega toka pride, ko hitrosti nekoliko padejo, vendar v prometnem toku še ne nastajajo zastoji (slika 4b). Do pomembnega in zanimivega pojava pride pri gostotah 0,27 in 0,28 vozila/celico. Pri 0,27 vozila/celico je pretok namreč v sinhronizirani fazi, že pri 0,28 vozila/celico pa preide v fazo nastanka zastojev. Očitno je pri gostoti 0,27 vozila/celico pretok nestabilen, saj le rahla motnja spremeni značilnost toka, kot je prikazano na dnu slike 4b.

3.2 Vpliv najvišje dovoljene hitrosti na izpuste CO₂ in pretok

Na sliki 5 je prikazan tridimenzionalni diagram izpustov CO₂ (v g/km) pri različnih gostotah (med 0 in 0,9 vozila/celico) vozil in različnih najvišjih hitrostih (med 30 in 110 km/h). Tu računamo količino izpustov na prevožen kilometer. Rezultati kažejo, da se vrednosti izpustov povečujejo z večanjem gostote. Ko gostota prometa znaša 0,7 ali več, so vrednosti izpustov enake pri vseh najvišjih dovoljenih hitrostih (1200 g/km), saj pri teh gostotah hitrosti ne presegajo niti najnižje vrednosti najvišje dovoljene hitrosti, ki znaša 30 km/h. Sklenemo lahko, da ne glede na najvišjo dovoljeno hitrost pri visokih gostotah prometa hitrosti ostajajo enake (slika 5).

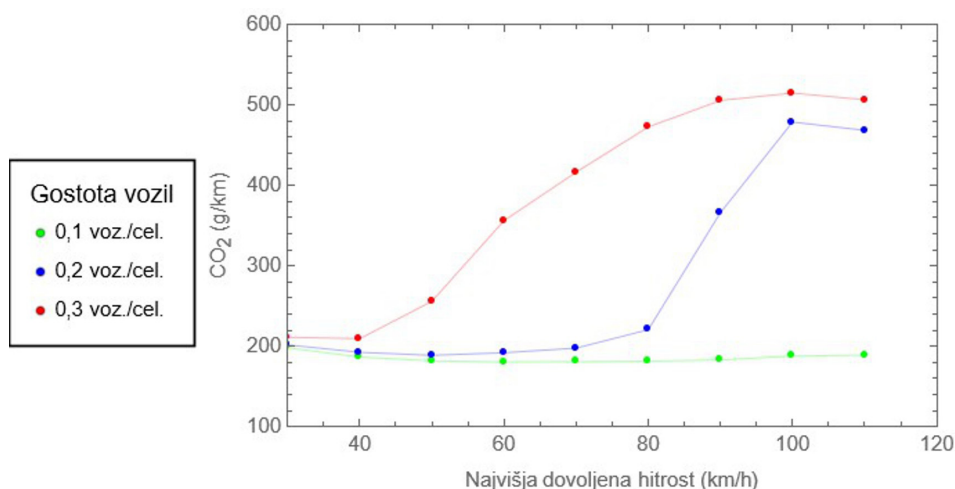
Slika 5: Izpusti CO₂ kot funkcija najvišje dovoljene hitrosti in gostote prometa.



Hkrati pa je pri nižjih vrednostih gostote, med 0,2 in 0,4, količina izpustov pri največji dovoljeni hitrosti 110 km/h več kot dvakrat višja kot pri hitrosti 30 km/h (slika 6). Razlog za ta pojav je pojav zastojev, ki pri teh gostotah nastanejo le pri višjih hitrostih. Pri gostoti 0,2 vozila/celico in hitrosti 110 km/h znaša količina izpustov 470 g/km, pri 30 km/h pa približno 200 g/km. Pri gostoti 0,4 vrednosti pri enakih hitrostih znašata približno 665 in 295 g/km.

Krivulje na sliki 6 prikazujejo različne vrednosti izpustov pri vseh proučevanih najvišjih dovoljenih hitrostih pri gostotah 0,1, 0,2 in 0,3 vozila/celico.

Slika 6: Izpusti CO₂ kot funkcija najvišje dovoljene hitrosti pri gostotah 0,1, 0,2 in 0,3 vozila/celico.

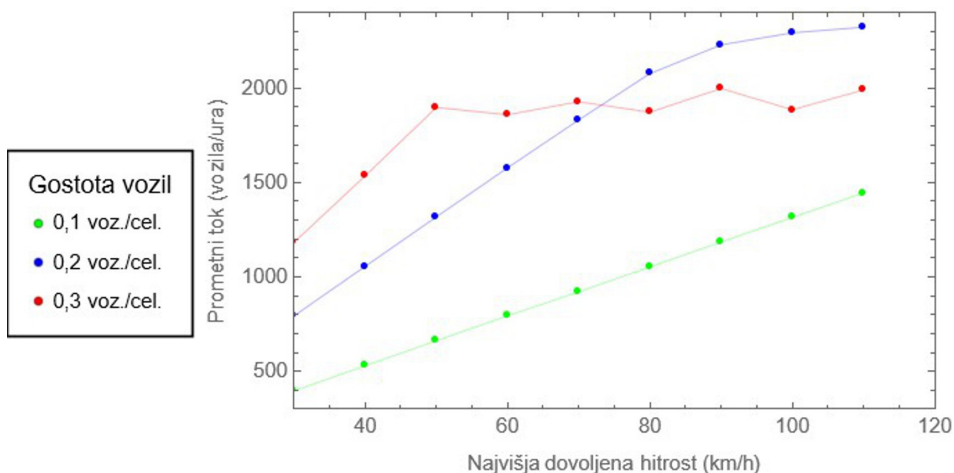


Pri gostoti 0,1 ne nastanejo zastoji pri nobeni najvišji dovoljeni hitrosti. Izpusti CO₂ dosežejo najnižjo vrednost pri hitrosti 60 km/h, kar ustreza najnižji emisijski stopnji porabe goriva pri nekaterih mikroskopskih emisijskih modelih za mestna območja (Quaassdorff in sod., 2022).

Pri gostoti 0,2 in največji hitrosti 80 km/h (kot je razvidno iz slike 6) je vrednost izpustov podobna vrednosti izpustov pri nižjih največjih dovoljenih hitrostih (220 g/km). Pri največji hitrosti 90 km/h vrednost izpustov hitro naraste (365 g/km), zato sklepamo, da se na tej točki začnejo pojavljati zastoji. Pri gostoti 0,3 se to zgodi že pri nižjih omejitvah hitrosti.

Na izpuste najbolj vpliva sprememba vrste prometnega toka, kar je razvidno iz slike 7.

Slika 7: Pretok kot funkcija najvišje dovoljene hitrosti pri gostotah 0,1, 0,2 in 0,3 vozila/celico.



Pri vrednosti gostote 0,2 in največjih dovoljenih hitrostih med 80 km/h in 100 km/h se vrednosti izpustov CO₂ več kot podvojijo, vendar pretok še vedno raste z naraščajočo največjo dovoljeno hitrostjo pri enakih preostalih parametrih.

Pri gostoti 0,1 pretok raste sorazmerno z največjo dovoljeno hitrostjo (slika 7), pri čemer ostaja količina izpustov skoraj konstantna (slika 5), med 185 in 190 g/km pri hitrostih med 40 in 110 km/h. To pomeni, da promet ostaja v fazi prostega toka pri vseh proučevanih vrednostih največje dovoljene hitrosti. Pri vrednosti gostote 0,3 začnejo izpusti hitro naraščati že pri najvišji dovoljeni hitrosti 50 km/h in rastejo z višanjem največje dovoljene hitrosti (slika 6) od 255 g/km do 505 g/km, čeprav se pretok povečuje le do največje dovoljene hitrosti 50 km/h, potem pa ostaja podoben (slika 7). To pomeni, da pri enakih vrednostih gostote agresivnejša vožnja, značilna za višjo najvišjo dovoljeno hitrost, pri višji vrednosti slednje prispeva k višjim vrednostim izpustov, ne pa k višjim vrednostim pretoka (tudi ne k nižjim vrednostim pretoka). Zaključimo lahko, da začne s spremembo vrste prometnega toka iz faze prostega toka v fazo sinhroniziranega toka količina izpustov CO₂ hitro naraščati, medtem ko obseg prometa ostaja enak. Z zmanjševanjem pretoka količina izpustov CO₂ raste še hitreje (slika 5). Več interakcij med vozili namreč pripomore k večji frekvenci pospeševanja in zaviranja ter posledično večji količini izpustov pri podobnem pretoku.

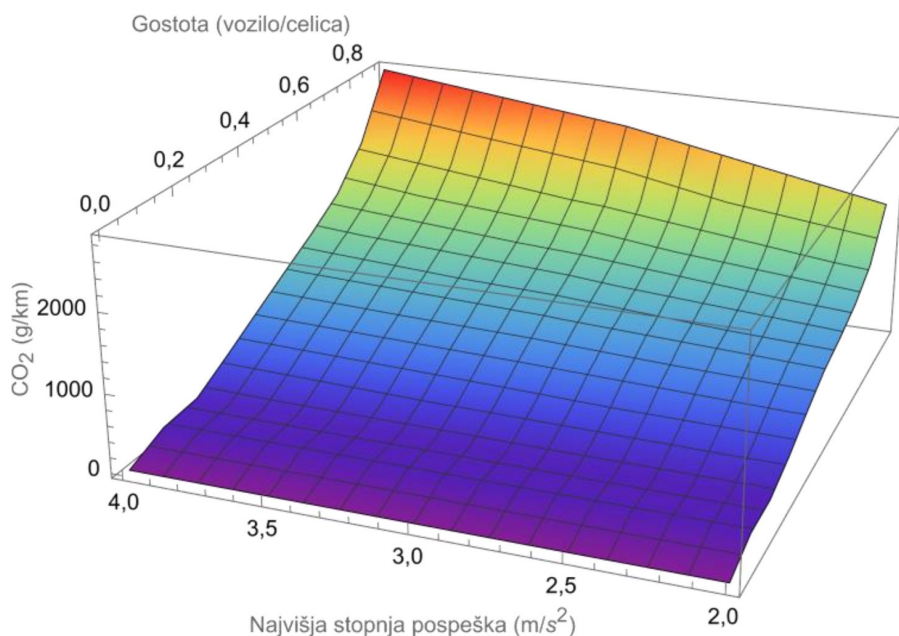
3.3 Vpliv najvišje stopnje pospeškov na izpuste CO₂

V drugi analizi proučujemo vpliv najvišje stopnje pospeška na izpuste CO₂. Na sliki 8 je prikazan tridimenzionalni diagram izpustov CO₂ (v g/km) pri različnih vrednostih

gostote (med 0 in 0,9) vozil in različnih najvišjih stopnjah pospeška (med 2 in 4 m/s²). Največja dovoljena hitrost je bila konstantna pri 70 km/h. Rezultati kažejo, da se razlika v količini izpustov med različnimi najvišjimi stopnjami pospeševanja večja z večjo gostoto prometa.

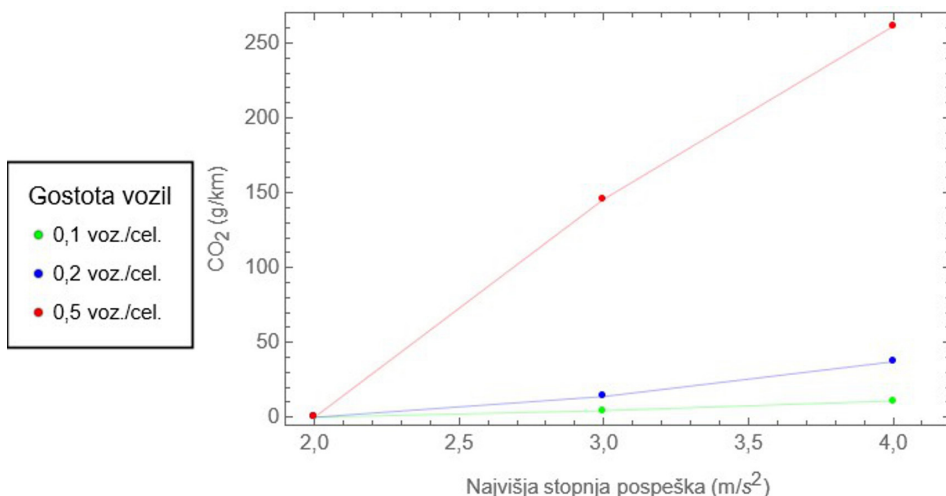
Slika 9 prikazuje različne količine izpustov pri različnih največjih stopnjah pospeševanja za vrednosti gostote 0,1, 0,2 oziroma 0,5. Pri gostoti 0,1 je interakcij med vozili malo, zato le redkokdaj pospešujejo, razen pri pospeševanju do najvišje dovoljene hitrosti, ki jo pozneje vzdržujejo.

Slika 8: Izpusti CO₂ kot funkcija najvišje stopnje pospeška in gostote.



Agresivni vozniki, ki, če je mogoče, pospešujejo s 4 m/s² (186 g/km), bi prispevali približno 6 % več izpustov CO₂ kot umirjeni vozniki z največjo stopnjo pospeševanja 2 m/s² (175 g/km). Pri gostoti 0,2 odstotek naraste na 15 % (od 186 g/km do 223 g/km), pri 0,5 pa na okoli 33 % (od 738 g/km do 999 g/km). Pri gostoti 0,9 agresivni vozniki (2861 g/km) prispevajo 60 % izpustov več kot umirjeni vozniki (1780 g/km).

Slika 9: Razlika v količini izpustov CO₂ med vožnjo z najvišjo in najnižjo stopnjo pospeševanja pri gostotah 0,1, 0,2 in 0,5 vozila/celico.



Razlike v količini izpustov nastanejo zaradi večje frekvence višjih stopenj pospeškov in pojemkov agresivnejših voznikov. Upoštevati je treba, da lahko agresivni vozniki z višjo najvišjo stopnjo pospeševanja pospešujejo tudi z nižjo stopnjo, če nimajo dovolj prostora, da bi pospešili z njihovo najvišjo mogočo stopnjo. Po drugi strani pa vedno zavrejo z enako stopnjo pojemka, ki predstavlja negativno vrednost njihove najvišje stopnje pospeška. Oboje vodi do bolj agresivne vožnje in posledično do visokih emisijskih vrednosti pri višjih gostotah, ko je več interakcij med vozili.

4 ZAKLJUČEK

V okviru raziskave so bile narejene simulacije prometnega toka, s čimer so bile analizirane značilnosti prometnega toka in vpliv različnih vrednosti gostote na pretok. Izračunan je bil tudi vpliv najvišje dovoljene hitrosti in največjega pospeška na izpuste CO₂. Simulacije prometnih tokov so bile narejene z razširjenim modelom LAI CA, ki smo ga v raziskavi nadgradili. Izpusti CO₂ iz prometa so bili izračunani z mikroskopskim emisijskim modelom PBL. V raziskavi smo proučevali prometni tok z namenom, da bi razumeli njegove značilnosti in ugotovili, na kakšen način bi lahko zmanjšali negativne vplive na okolje na odseku 1500 m dolge ceste z enim pasom, pri čemer smo se tokrat osredotočili na izpuste CO₂. Menimo, da razumevanje notranje dinamike prometa omogoča lažje in pravilnejše odločanje za ukrepe v prometu.

Temeljni diagrami simulacij prometnih tokov kažejo, da doseže prometni tok pri najvišji dovoljeni hitrosti 70 km/h največjo vrednost 2122 vozil/uro pri gostoti 0,25 vozila/celico. Pri 0,28 pride do nenadnega padca pretoka. Prometni tok se namreč že pred tem

začne spreminjati iz faze prostega toka v fazo zastojev. Do gostote 0,22 je prometni tok v fazi prostega toka, pri čemer je povprečna hitrost blizu najvišje dovoljene hitrosti. Med gostotama je prometni tok v fazi sinhroniziranega toka, ko hitrost vozil pade za 16 km/h od največje dovoljene hitrosti. Hkrati se njihova hitrost stabilizira, vozila pa med seboj vzdržujejo podobno razdaljo na celotnem cestnem odseku. Prelomna točka nastopi, ko je gostota $\rho > 0,27$, in sicer s povečanjem gostote le za 0,01, kar povzroči fazno spremembo prometnega toka iz sinhronizirane faze v fazo nastanka zastojev. Na tej točki hitrost vozil zaradi vzdrževanja varne razdalje vozil znatno pade.

S povečevanjem gostote v prometu od vrednosti 0,25 vozila/celico naprej pretok pada. Tako se ob zgoščanju prometa pretok in potovalna hitrost še zmanjšata, kar še poveča zastoje in izpuste CO₂. To povzroča še druge negativne posledice na okolje, na primer več dalj časa trajajočega hrupa in večjo zasedenost prostora z vozili. Omeniti velja tudi negativne gospodarske posledice, saj ljudje več časa preživijo v vozilih, kar povzroča utrujenost in povečuje verjetnost, da pride do prometnih nesreč. V času prometnih zgostitev bi bilo torej koristno zmanjšati gostoto prometa, da bi dosegli čim bolj optimalen pretok ali vsaj preprečili nadaljnje zgoščanje prometa. S tem bi povečali njegovo učinkovitost in hkrati zmanjšali negativne vplive na okolje. Zavedamo se, da je promet kompleksen sistem in da je velike spremembe v kratkem času težko doseči, saj zahtevajo dolgoročno načrtovanje. Vendar lahko že kratkoročno prispevamo k preprečevanju zastojev tako, da se, če je le mogoče, izogibamo vožnji v času prometnih zastojev, kar lahko dosežemo z občasnim delom od doma, uporabo javnega prevoza ter potovanji pred predvidenimi prometnimi konicami ali po njih. Omeniti velja tudi tehnološke rešitve. Avtomatsko povezovanje vozil v konvoje bi izboljšalo pretok prometa, k čemur bi prispevale tudi izboljšane spletne aplikacije, ki vozniku že pred začetkom potovanja ali na pomembnih križiščih pomagajo izbrati optimalno pot s stališča pretoka prometa. Zagotovo bi k zmanjšanju zastojev prispeval tudi učinkovitejši javni promet.

V raziskavi smo ugotavljali, kako na izpuste CO₂ vpliva najvišja dovoljena hitrost. Prišli smo do zaključka, da ima ta največji vpliv med vrednostma gostote vozil, ko je količina izpustov CO₂ pri najvišji dovoljeni hitrosti 110 km/h več kot dvakrat višja kot pri hitrosti 30 km/h. Pri omenjenih gostotah pride do faznih sprememb prometnega toka le pri višjih hitrostih, ko se prometni tok spremeni iz prostega v sinhronizirani tok. Pri višji najvišji dovoljeni hitrosti vozila namreč, kadar lahko, vozijo hitreje, zato pride do pogostejših interakcij (pospeševanja, zaviranja) med vozili, pri čemer začne količina izpustov hitro naraščati, čeprav obseg prometa ostaja podoben (slika 6). Pri gostoti 0,1 je promet pri vseh proučevanih hitrostih v prostem toku, zato ni velikih razlik v količini izpustov. Vendar pa je pri enaki gostoti pretok pri najnižji dovoljeni hitrosti približno petkrat manjši kot pri najvišji dovoljeni hitrosti, tako da pri tem velja upoštevati tudi gospodarski učinek prometa. Pri višjih gostotah, ko je prometni tok v fazi nastanka zastojev, hkrati s povečevanjem količine izpustov pada tudi pretok, in sicer pri vseh proučevanih omejitvah hitrosti. Dolgoročno bi bila rešitev napredna tehnologija, s pomočjo katere so vozila med seboj povezana in težijo k vožnji v

konvojih. Tudi drugi morebitni ukrep je tehnološki, in sicer spreminjanje omejitve hitrosti glede na gostoto prometa na določenem odseku.

Raziskava vključuje tudi vpliv agresivnosti vožnje na izpuste, in sicer pri konstantni hitrosti 70 km/h in različnih pospeških. Rezultati kažejo, da se razlika med izpusti pri različnih najvišjih stopnjah pospeševanja večja z gostoto prometa. Pri gostoti 0,1 je interakcij med vozili malo, zato redko pospešujejo, razen pri pospeševanju do najvišje dovoljene hitrosti. Pri tem agresivni vozniki, ki stremijo k pospeševanju s 4 m/s², prispevajo približno 6 % več izpustov CO₂ kot umirjeni vozniki z najvišjo hitrostjo pospeševanja 2 m/s². Pri gostoti 0,2 razlika naraste na 15 %, pri 0,5 pa na okoli 33 %. Pri gostoti 0,9 je razlika v prispevku izpustov med agresivnimi in umirjenimi vozniki že več kot 60 %. Okoljsko najbolj sprejemljiva vožnja je torej umirjena vožnja s čim manj sunkovitimi pospeški, zato predlagamo spodbujanje umirjenega načina vožnje. S stališča gospodarskega učinka prometa pa ni dobro, da vozila vozijo veliko počasneje od omejitev, saj to še posebej pri manjši gostoti precej zmanjšuje pretok prometa. Zmanjševanje števila vozil v mestih spodbujajo prometni ukrepi, kot so uvedba novih avtobusnih povezav, parkirišča zunaj mestnih središč, zaprtja mestnih središč, uvedba rumenih pasov za avtobuse in sistemi izposoje koles. To prispeva k manjšim zastojem in povečanju pretoka prometa ter manjšim količinam izpustov. Seveda vsak izmed teh ukrepov zahteva natančne meritve, da bi lahko ovrednotili njegovo učinkovitost.

Informacije o nepovratnih sredstvih

Del raziskave je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS (raziskovalni program P2-0260).

Avtorja nimata finančnih ali nefinančnih interesov, ki bi jih morala razkriti.

Literatura in viri

- Barlovic, R., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M., 1998. Metastable states in cellular automata for traffic flow, 5, str. 793–800. DOI: 10.1007/s100510050504.
- Benjamin, S. C., Johnson, N. F., Hui, P. M., 1996. Cellular automata models of traffic flow along a highway containing a junction. Physics Department, Clarendon Laboratory, Oxford University, str. 1–18. DOI: 10.1088/0305-4470/29/12/018.
- Chowdhury, D., Santen, L., Schadschneider, A., 2000. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. Physics Reports, 329, 4-6, str. 199–329. DOI: 10.1016/S0370-1573(99)00117-9.
- De Vlieger, I., Keukeleere, D. D., Kretzschmar, G. J., 2000. Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. Atmospheric Environment, 34, 27, str. 4649–4655. DOI: 10.1016/S1352-2310(00)00217-X.
- Escap, U., 2019. Using smart transport technologies to mitigate greenhouse gas emissions from the transport sector in Asia. URL: <https://repository.unescap.org/handle/20.500.12870/344> (citirano 8. 1. 2024).

- Feng, T., Liu, K., Liang, C., 2023. An improved cellular automata traffic flow model considering driving styles. *Sustainability*, 15, 2, str. 1–19. DOI: 10.3390/su15020952.
- Glojek, K., Gregorič, A., Ogrin, M., 2019. Black carbon air pollution – case study of Loški Potok. *Dela*, 50, str. 25–43. DOI: 10.4312/dela.50.5-43.
- Guzman, H., Larraga, M. E., Alvarez-Icaza, L., 2015. A two lanes cellular automata model for traffic flow considering realistic driving decisions. *Journal of Cellular Automata*, 10, 1-2, str. 65–93.
- Guzman, H.A., Larraga, M.E., Alvarez-Icaza, L., Carvajal, J., 2018. A cellular automata model for traffic flow based on kinetics theory, vehicles capabilities and driver reactions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 491, str. 528–548. DOI: 10.1016/j.physa.2017.09.094.
- Halakoo, M., Yang, H., Abdulsattar, H., 2023. Heterogeneity aware emission macroscopic fundamental diagram (e-MFD). *Sustainability*, 15, 2. DOI: 10.3390/su15021653.
- Hoek, G., Brunekreef, B., Goldbohm, S., Fischer, P., van den Brandt, P. A., 2002. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: A cohort study. *Lancet*, 360, str. 1203–1209.
- Ježek, I., 2015. Contribution of traffic and biomass burning to air pollution discriminated with Aethalometer measurements of black carbon. Doctoral thesis. Ljubljana: University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Department of Physics.
- Ježek, I., Kutrašnik, T., Westerdahl, D., Močnik, G., 2015. Black carbon, particle number concentration and nitrogen oxide emission factors of random in-use vehicles measured with the on-road chasing method. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, str. 11011–11026.
- Karafyllidis, I., Thanailakis, A., 1998. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 99, 1. DOI: 10.1016/S0304-3800(96)01942-4.
- Kerner, B. S., Klenov, S. L., Wolf, D. E., 2002. Cellular automata approach to three-phase traffic theory. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 33, str. 9971–10013. DOI: 10.1088/0305-4470/35/47/303.
- Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M., 2000. Towards a realistic microscopic description of highway traffic. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 33, str. 479–485. DOI: 10.1088/0305-4470/33/48/103.
- Larraga, M. E., Alvarez-Icaza, L., 2010. Cellular automaton model for traffic flow based on safe driving policies and human reactions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389, 23, str. 5425–5438. DOI: 10.1016/j.physa.2010.08.020.
- Li, X., Li, X., Xiao, Y., Jia, B., 2016. Modeling mechanical restriction differences between car and heavy truck in two-lane cellular automata traffic flow model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 451, str. 49–62. DOI: 10.1016/j.physa.2015.12.157.

- Maerivoet, S., De Moor, B., 2005. Cellular automata models of road traffic. *Physics Reports*, 419, 1, str. 1–64. DOI: 10.1016/j.physrep.2005.08.005.
- Marzoug, R., Lakouari, N., Perez Cruz, J. R., Vega Gomez, C. J., 2022. Cellular automata model for analysis and optimization of traffic emission at signalized intersection. *Sustainability*, 14, 21. DOI: 10.3390/su142114048.
- Nagel, K., Schreckenberg, M., 1992. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2, 12, str. 2221–2229. DOI: 10.1051/jp1:1992277.
- Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Samaras, Z., 2009. COPERT: A European road transport emission inventory model. V: Athanasiadis, I. N., Rizzoli, A. E., Mitkas, P. A., Gómez, J. M. (ur.). *Information technologies in environmental engineering*. Springer, str. 491–504. DOI: 10.1007/978-3-540-88351-7_37.
- Ogrin, M., 2007. Air pollution due to road traffic in Ljubljana. *Dela*, 27, str. 199–214.
- Ogrin, M., 2018. Prometno obremenjevanje ozračja. V: *Okoljski učinki prometa in turizma v Sloveniji*. Ljubljana: Znanstvena založba Filozofske fakultete, str. 62–72. URL: <https://ebooks.uni-lj.si/ZalozbaUL/catalog/view/60/129/1381> (citirano 8. 1. 2024).
- Pan, W., Xue, Y., He, H. D., Lu, W. Z., 2018. Impacts of traffic congestion on fuel rate, dissipation and particle emission in a single lane based on NaSch Model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 503, str. 154–162. DOI: 10.1088/1748-9326/ac8b21.
- Panis, L. I., Broekx, S., Liu, R., 2006. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science of The Total Environment*, 371, str. 270–285. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.08.017.
- Pinto, N., Antunes, A. P., Roca, J., 2021. A cellular automata model for integrated simulation of land use and transport interactions. *International Journal of Geo-Information*, 10, 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10030149>.
- Quaassdorff, C., Smit, R., Borge, R., Hausberger, S., 2022. Comparison of microscale traffic emission models for urban networks. *Environmental Research*, 17, str. 1–15. DOI: 10.1088/1748-9326/ac8b21.
- Rakha, H., Van Aerde, M., Ahn, K., Trani, A., 2000. Requirements for evaluating traffic signal control impacts on energy and emissions based on instantaneous speed and acceleration measurements. *Transportation Research Record*, 1738, str. 56–67. DOI: 10.3390/ijgi10030149.
- Strle, D., Svetlin, D., Glojek, K., Kobal, M., Pogačnik, K., Ogrin, M., 2020. Meritve koncentracij črnega ogljika in dušikovega dioksida na Lavrici in v Kranju. *Dela*, 54, str. 5–27. DOI: 10.4312/dela.54.5-52.
- Takayasu, M., Takayasu, H., 1993. 1/f noise in a traffic model. *Fractals*, 1, 4, str. 860–966. DOI: 10.1142/S0218348X93000885.
- Treiber, M., Kesting, A., Thiemann, C., 2008. How much does traffic congestion increase fuel consumption and emissions? applying a fuel consumption model to the NGSIM trajectory data. *TRB 87th Annual Meeting Compendium of Papers*, DVD, str. 1–17. URL: <https://trid.trb.org/view/848721> (citirano 8. 1. 2024).

- Wolfram, S., 1983. Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, 55, str. 601–644. DOI: 10.1103/RevModPhys.55.601.
- Xu, Q., Xing Zhu, A.X., Liu, J., 2023. Land-use change modeling with cellular automata using land natural evolution unit. *Catena*, 224. DOI: 10.1016/j.catena.2023.106998.
- Xue, Y., Wang, X., Cen, B. L., Zhang, P., He, H. D., 2020. Study on fuel consumption in the Kerner–Klenov–Wolf three-phase cellular automaton traffic flow model. *Non-linear Dynamics*, 102, str. 393–402. DOI: 10.1007/s11071-020-05947-2.
- Zeng, J., Qian, Y., Li, J., Zhang, Y., Xu, D., 2023. Congestion and energy consumption of heterogeneous traffic flow mixed with intelligent connected vehicles and platoons. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 609, str. 1–17. DOI: 10.1016/j.physa.2022.128331.