



dr. Marko Kovač, univ. dipl. inž. stroj.
marko.kovac@ijs.si



Matjaž Česen, univ. dipl. meteorolog
matjaz.cesen@ijs.si

Center za energetska učinkovitost Instituta Jožef Stefan, Jamova
cesta 39, Ljubljana



Strokovni članek

UDK/UDC: 502.131.1:614.71:656.11(497.4)

MODELIRANJE IZPUSTOV TOPLOGREDNIH PLINOV IN ONESNAŽEVAL ZRAKA UPORABNIKOV AVTOCESTNEGA SISTEMA V SLOVENIJI

MODELLING GREENHOUSE GAS AND AIR POLLUTANT EMISSIONS FROM USERS OF THE MOTORWAY SYSTEM IN SLOVENIA

Povzetek

Prispevek predstavlja metodologijo in praktičen izračun izpustov toplogrednih plinov in onesnaževal zraka, ki nastajajo pri uporabi slovenskega avtocestnega sistema. Uporabljena je kombinacija modela omrežja, ki temelji na podatkih števecv prometa, in emisijskega modela COPERT, prilagojenega evropskim standardom in lokalnim razmeram. Metodologija sledi zahtevam GHG Protokola in direktive CSRD. Raziskava poudarja pomembnost kakovostnega modeliranja izpustov obsega 3 za strateško okoljsko upravljanje. Avto- in hitre ceste so pomemben vir toplogrednih plinov, a s spremljanjem podatkov upravljalcem omogočajo tudi razvoj politik in posledično izvedbo projektov za učinkovito upravljanje tovornih izpustov. Avto- in hitre ceste imajo prav zaradi intenzivnosti prometa ključen vpliv na izpuste, a se je hkrati izkazalo, da so ti glede na obseg cestnega omrežja razmeroma omejeni. Predlagane so smernice za nadaljnji razvoj modela, vključno z vključevanjem podatkov o vremenu, zastojih in uveljavljanjem trajnostne mobilnosti.

Ključne besede: izpusti, promet, avtoceste

Summary

The article presents a methodology and practical calculation of greenhouse gas and air pollutant emissions generated by the users of the Slovenian motorway system. It uses a combination of a network model based on traffic counter data and the COPERT emission model, adapted to European standards and local specifics. The methodology follows the requirements of the GHG Protocol and the CSRD Directive. The study emphasizes the importance of high-quality emission modelling for strategic environmental management. Motorways and expressways are a significant source of greenhouse gases, but by monitoring data, operators can develop appropriate policies and, consequently, implement projects for the effective management of these emissions. Due to traffic intensity, motorways and expressways have a key impact on emissions; however, at the same time, emissions have been found to be relatively limited given the extent of the road network. Guidelines for further development of the model are proposed, including the incorporation of data on weather, traffic jams, and the promotion of sustainable mobility.

Key words: emissions, traffic, motorways

1 UVOD

Povečevanje količine cestnega prometa v EU, tako osebnega kot tovornega, predstavlja velik izziv pri naporih za zmanjševanje izpustov toplogrednih plinov in onesnaževal zraka [EEA, 2024; T&E, 2024]. Eden temeljnih pogojev za obvladovanje tveganj zaradi povečanega obsega onesnaževanja je natančen in učinkovit nadzor izpustov [Domagača, 2023; Nkesah, 2023].

Zahteve po trajnostnem razvoju v gradbeništvu prinašajo številne novosti, ki v večji meri upoštevajo okoljske vplive [Kegljevič Zagorc, 2019]. Hkrati pa poslovanje sodobnih podjetij, ki upoštevajo širšo družbeno odgovornost, zahteva ustrezno obravnavo in zmanjševanje vplivov poslovanja na okolje. Pri tem sta ključnega pomena razumevanje in kvantifikacija izpustov tako toplogrednih plinov kot onesnaževal zraka. Z izračunom izpustov obsega 3 (angl. Scope 3) podjetja pridobijo dodaten vpogled v svoj vpliv na okolje, kar lahko pripomore k dodatnim priložnostim za optimizacijo in izboljšanje učinkovitosti. Glede na direktivo CSRD (angl. Corporate Sustainability Reporting Directive) morajo podjetja v EU od leta 2025 dalje poročati o posrednih izpustih tudi v svoji vrednostni verigi – izpustih obsega 3 [CSRD, 2022]. Izpusti obsega 3 vključujejo toplogredne pline, ki nastajajo na začetku in na koncu vrednostne verige. Eden bolj uveljavljenih modelov za izračun izpustov obsega 3 je GHG-protokol [GHG Protocol, 2023]. DARS kot upravljavec avtocestnega omrežja sledi zahtevam direktive CSRD kot tudi GHG-protokola.

GHG-protokol in tudi standard ISO 14083:2023 [ISO, 2023] sta razmeroma splošna in vsebujeta pretežno posplošena navodila o izračunu izpustov obsega 3, ki jih je treba ustrezno prilagoditi za namen izračuna izpustov uporabnikov prometne infrastrukture. Prav tako je poročanje o posrednih izpustih postalo obveza šele od leta 2025 dalje, zato je obseg strokovne literature, še posebno tiste, ki se osredotoča na upravljavce prometne infrastrukture, razmeroma omejen. Nekatere tovrstne prakse je mogoče razbrati iz poročil družb, ki se ukvarjajo z upravljanjem prometne infrastrukture, na primer Die Autobahn [Die Autobahn, 2022], Asfinag [Asfinag, 2021] in upravljavci mostu Storebælt [Storebælt, 2022].

Drugi primeri splošnega pregleda izpustov uporabnikov prometne infrastrukture so Kazancoglu in dr. [Kazancoglu, 2021] ter Gnap in dr. [Gnap, 2020]. V obeh primerih so se osredotočili na izračune izpustov obsega 3 za evropsko avtocestno omrežje, pri čemer pa so uporabljeni razmeroma generični pristopi, ki ne upoštevajo specifik prometa na posameznih odsekih. Spet drugi, na primer Olivari in dr. [Olivari, 2025], so se osredotočili zgolj na tovorni promet. Lep pregled specifične analize izpustov obsega 3 iz prometa so izvedli Roukounakis in dr. [Roukounakis, 2020], pri čemer pa so se omejili le na del grškega avtocestnega omrežja (odsek A2 Egnatia Odos).

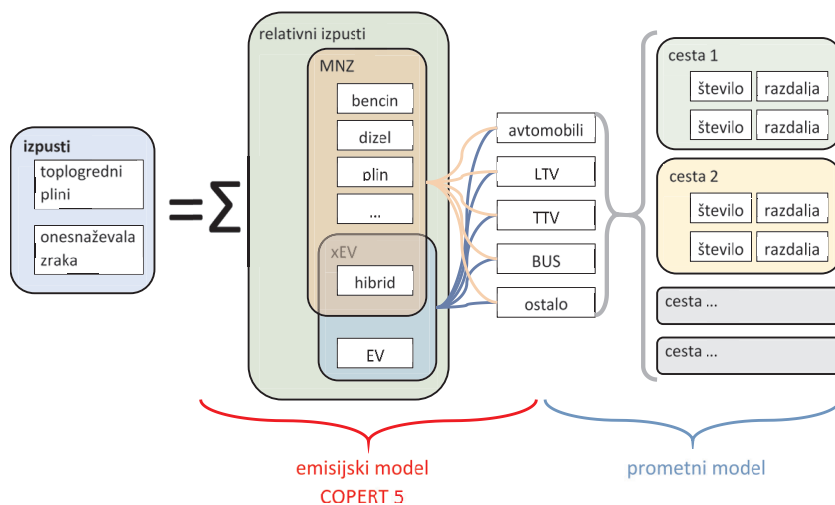
Glavni cilj tega prispevka je predstaviti razvoj in uporabo modela za oceno izpustov toplogrednih plinov in onesnaževal zraka, ki nastanejo zaradi uporabe slovenskih avtocest. Rezultate modela je mogoče neposredno uporabiti za potrebe poročanja, podobno kot to počnejo že nekateri upravljavci prometne infrastrukture po svetu. Pomemben vidik pri izdelavi modela predstavlja tudi razumevanje lokalne intenzivnosti prometa, strukture vozil in prostorskih posebnosti slovenskega avtocestnega omrežja.

2 METODOLOGIJA

Poročanje izpustov toplogrednih plinov zajema naslednje pline: ogljikov dioksid (CO₂), metan (CH₄), didušikov oksid (N₂O). Izpusti F-plinov niso vezani na uporabo avtocest, zato niso zajeti v analizo, izpusti NF₃ pa se v Sloveniji ne pojavljajo. Pri onesnaževalih zraka so bili analizirani žvepovi oksidi (SO_x) in dušikovi oksidi (NO_x) [IPCC, 2006; Ntziachristos, 2023] ter izpusti delcev (PM_{2.5}), za katere smatramo, da bodo v naslednjih letih deležni še večje pozornosti, sploh v prometu.

2.1 Modeliranje izpustov v prometu

Izpusti posameznega vozila so odvisni od emisijskega modela, ki določa izpuste glede na prometno delo (prevoženo razdaljo), in modela omrežja, ki določa prevoženo razdaljo vseh vozil uporabnikov avto- in hitrih cest. Slika 1 shematsko prikazuje izračun izpustov (toplogrednih plinov in onesnaževal zraka) iz prometa, ki zajema izpuste vseh vozil.



Slika 1. Shematski prikaz izračuna izpustov.

2.1.1 Emisijski model

Ocena izpustov iz cestnega prometa temelji na metodi, ki uporablja preverjene emisijske faktorje in podatke o prevoženih razdaljah (t. i. metodologija od spodaj navzgor – angl. bottom-up). Pri tem je bil uporabljen emisijski model COPERT 5 – široko uporabljeno programsko orodje, zasnovano za ocenjevanje izpustov iz cestnega prometa, s poudarkom na izpustih toplogrednih plinov in onesnaževal zraka [JRC, 2014; Ntziachristos, 2009].

Emisijski model COPERT 5 upošteva kategorije vozil in vrste goriva, emisijski razred (EURO standard) in vozne pogoje. Za natančno oceno izpustov se opira na vhodne parametre, kot so število vozil, njihova hitrost in poraba ter vrsta poti in prevožena razdalja. Model COPERT 5 omogoča izračun izpustov tudi v različnih prometnih režimih (mestni, podeželski, avtocestni) ter stanja delovanja motorja (hladen zagon ali ogret motor). Osnovna enačba za izračun izpustov je:

$$\text{izpusti [g]} = \text{emisijski faktor} \left[\frac{\text{g}}{\text{km}} \right] \times \text{število vozil} \times \text{prevožena razdalja na vozilo [km]} \quad (1)$$

Emisijski faktor je odvisen od številnih dejavnikov, vključujoč razdaljo, ki jo vozilo prepotuje, hitrost vozila (in vrsta ceste), starosti in teže vozila ter prostornine motorja. Za izračune so bili uporabljeni podatki o strukturi voznega parka v Sloveniji iz leta 2022 [OPSI, 2023b].

Čeprav uporabljeni model COPERT 5 zagotavlja solidno osnovo za izračun izpustov na nivoju države, je smiselno parametre modela prilagoditi realnemu režimu vožnje na avto- in hitrih cestah v republiki Sloveniji. Zato so bili upoštevani podatki o povprečnih hitrostih vožnje, ki jih je mogoče pridobiti iz podatkov števecv prometa. Ti omogočajo beleženje povprečne hitrosti za vsa vozila in še posebej za osebna vozila. Nadaljnja prilagoditev modela z namenom bolj realistične ocene izpustov upošteva tudi dodatne izpuste zaradi vožnje tovornih vozil v klanec.

Vozila so bila zaradi skladnosti tako s prometnim modelom kot s podatki števecv razvrščena v pet razredov: avtomobili (cestninska kategorija A1), lahka (A2 in B1) in težka tovorna vozila (B2, B3, B4 in B5), avtobusi (C1 in C2) in druga vozila (A0 in XX).

2.2 Model omrežja

Slovensko avtocestno omrežje, ki ga upravlja družba DARS, obsega pet avtocest in pet hitrih cest, katerih skupna dolžina je 616 km. Poleg glavnih večpasovnih avto- in hitrih cest v sistem DARS v omrežje sodijo tudi priključki (skupaj slabih 163 km) in pomožne ceste (41,6 km). Pridobljeni so bili podatki 175 števecv,

s katerimi smo omrežje avto- in hitrih cest razdelili na 100 odsekov. Števci beležijo promet ločeno po smeri, tipu vozil in času, uporabljeni pa so bili podatki za leto 2023.

Slika 2 prikazuje koncept preračuna prometnega dela na avto- in hitrih cestah: prometno delo je vsota vseh zmnožkov (po odsekih) števila vozil in dolžine posameznega odseka.

Za potrebe analize so bile avto- in hitre ceste razdeljene na odseke, kot so definirani s strani DRSI [DRSI, 2024]. Takšen pristop omogoča primerjavo s podobnimi modeli omrežja, vendar se je izkazalo, da nekateri odseki nimajo svojega števnege mesta, prav tako imajo nekateri odseki dodatne uvoze in izvoze, kjer ni mogoče ugotoviti prevožene razdalje. Za določitev prometnega dela na omenjenih odsekih je bila uporabljena ustrezna interpolacija podatkov z upoštevanjem pretekle dobre prakse [Lipar, 2018]. Podobno velja za priključke, ki praviloma niso opremljeni z ustreznimi števci. Tudi tu so bili podatki ustrezno porazdeljeni glede na količino prometa na glavnih cestah, dolžine priključkov in število pasov.

Uporabljeni so bili 15-minutni časovni intervali, ki omogočajo tako dnevno kot sezonsko visoko ločljivost podatkov. Slika 3 prikazuje primer analize – število vseh vozil (rdeča barva), ki so bila v letu 2023 zabeležena na odsekih avtoceste A1. Priključki so prikazani v modri barvi spodaj. Na sliki so opazna nihanja števila vozil v okolici Ljubljane. Ta nihanja so na razcepah Zdobrova (odcep H3), Malence (A2) in Kozarje (A2) in so posledica radialnih prometnih tokov. Ustrezni prometni tokovi so bili zato upoštevani na priključnih cestah.

Zaradi različnih izpustov osebnih in tovornih vozil je smiselno pridobiti hitrostni profil za vsak tip vozil. Povprečno hitrost težkih tovornih vozil v_{TTV} lahko ocenimo iz podatkov o povprečni hitrosti vseh vozil v_{avg} in povprečni hitrosti avtomobilov v_A :

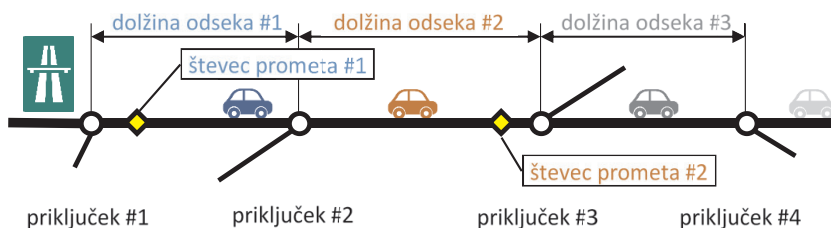
$$v_{TTV} = \frac{v_{avg} - v_A \cdot \delta_A}{\delta_{TTV}} \quad (2)$$

Pri tem δ_A in δ_{TTV} predstavljata deleža prometa z avtomobili oziroma težkimi tovornimi vozili, pri čemer smo za lažji izračun predpostavili komplementarnost deležev:

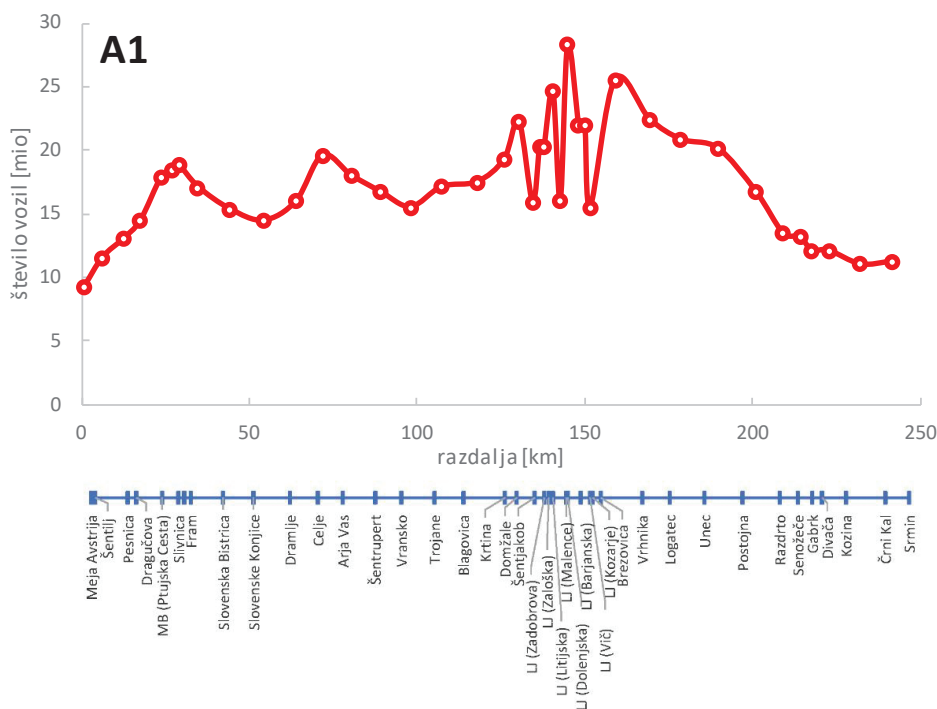
$$\delta_A + \delta_{TTV} = 1 \quad (3)$$

Slika 4 prikazuje histogram povprečnih hitrosti vseh vozil na avto- in hitrih cestah (levo) ter z dekompozicijo pridobljena histograma povprečnih hitrosti avtomobilov (desno zgoraj) in težkih tovornih vozil (desno spodaj).

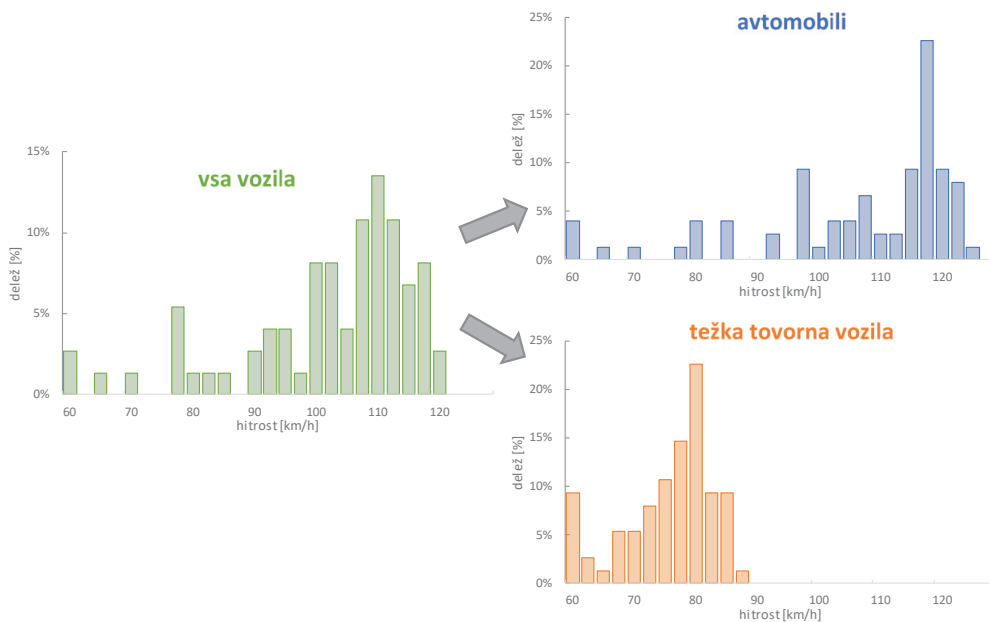
Povprečna hitrost avtomobilov, z upoštevanjem zastojev in sezonskih nihanj, znaša 120 km/h, povprečna hitrost težkih tovornih vozil pa 78 km/h.



Slika 2. Koncept preračuna prometnega dela s štetjem prometa in dolžino prevožene razdalje.



Slika 3. Število vozil, ki so jih zabeležili števcji na avtocesti A1.



Slika 4. Skupni histogram povprečnih hitrosti vseh vozil na avto- in hitrih cestah (levo) in razdelitev na avtomobile (desno zgoraj) in težka tovorna vozila (desno spodaj).

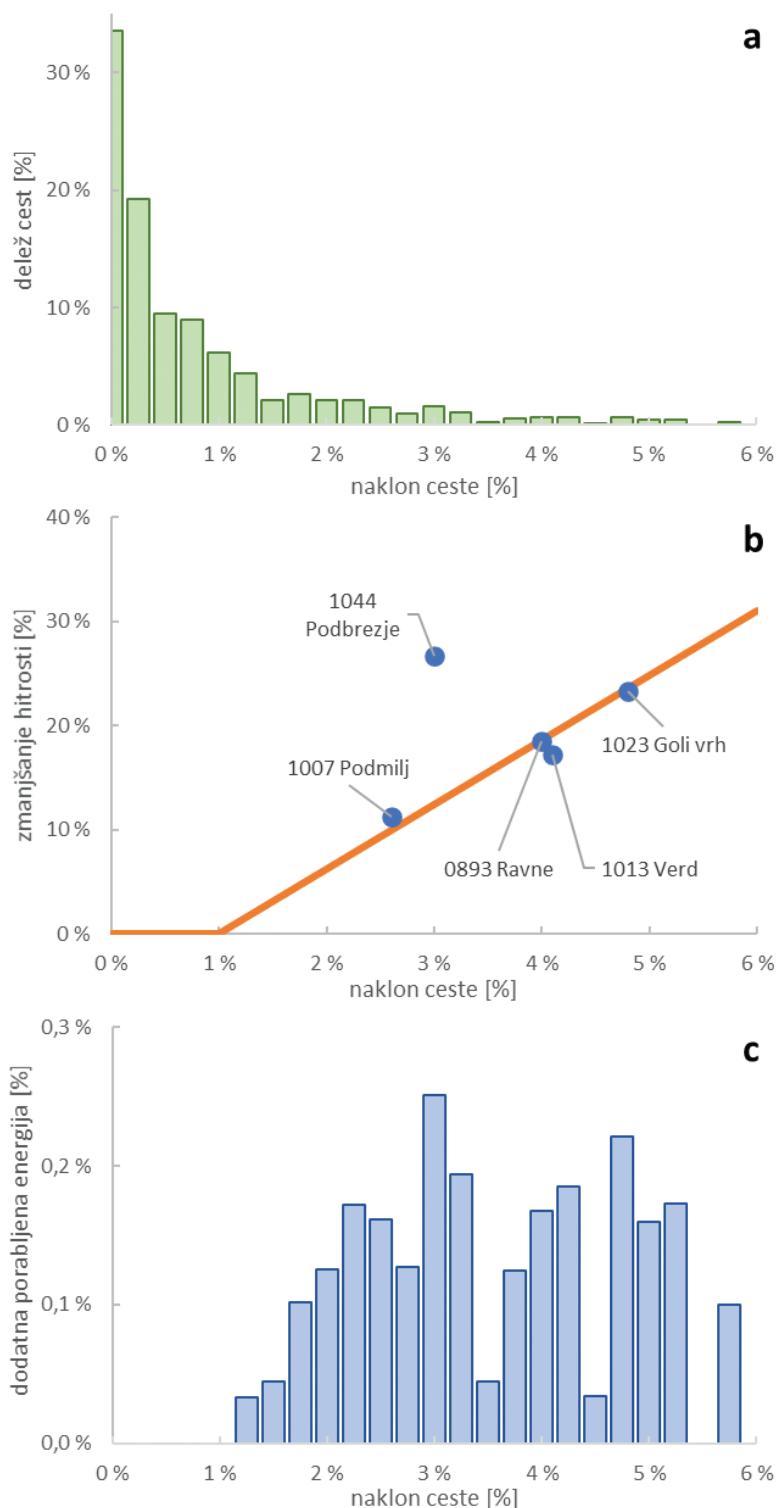
Model COPERT 5 v splošnem ne upošteva porasta porabe goriva in izpustov kot posledico vožnje prek hribovitega terena. Kljub pregovorni razgibanosti Slovenije ima prek 50 % odsekov avto- in hitrih cest naklon manjši kot 0,5 %, kot je razvidno s slike 5a. Naklon 3 % in več ima le 5 % odsekov cest. Analiza podatkov vožnje težkih tovornih vozil kaže, da je njihova hitrost navkreber precej odvisna od naklona ceste [Traveset-Baro, 2015; Zhou, 2017]. Pri tem vozila zaradi premagovanja klanca porabljajo dodatno gorivo oziroma izpuščajo dodatne izpuste.

Za določitev režima delovanja pa je določitev hitrosti ključnega pomena. Ob tem je treba poudariti, da pri vožnji navzdol praviloma zavirajo, da ne preokorajijo predpisane največje hitrosti, kar tudi pomeni, da izničijo potencialno energijo, ki so jo pridobili pri vožnji navzgor.

Slika 5b prikazuje ugotovljeno zmanjšanje hitrosti težkih tovornih vozil v odvisnosti od naklona ceste. Z modrimi pikami so označeni podatki klancev, ki imajo podatke števcjev, s črtkano

modro črto je vrisana linearna aproksimacija, z oranžno črto pa predlagan model vpliva klancev. Zanimivi so podatki števec 1044 Podbrezje, kjer se izkaže večje zmanjšanje hitrosti. Vzrok za to je v geografskih posebnostih – števec je pred pomembnim razcepom, kjer se pojavljajo zastoji in s tem dodatna zni-

žanja hitrosti. Predlagani model predvideva, da naklon do 1 % nima pomembnega vpliva na hitrost težkega tovornega vozila. Vsak odstotek nad tem pomeni zmanjšanje hitrosti po klancu navzgor za 10 %. S predpostavko povprečne hitrosti težkega tovornega vozila na avto- in hitrih cestah 80 km/h to zmanjša-



Slika 5. Histogram naklonov avto- in hitrih cest (a), zmanjšanje hitrosti težkih tovornih vozil v odvisnosti od naklona ceste (b) in prispevki k dodatni porabljeni energiji glede na naklon ceste.

nje pomeni 8 km/h za vsak odstotek nad 2 %. Z upoštevanjem deleža naklonov odsekov avto- in hitrih cest je mogoče določiti pribitke zaradi povečane porabe (in izpustov) pri vožnji navkreber za težka tovorna vozila za vsak odsek glede na naklon ceste, kar je prikazano na sliki 5c.

Glede na analizirane podatke za avto- in hitre ceste je mogoče ugotoviti, da klanci na avto- in hitrih cestah povzročijo dodatno porabo goriva za težka tovorna vozila v višini 1,3 %. Ta metodologija omogoča tudi pomemben vpogled za snovanje novih avtocest, kjer ugodnejši profil pomeni manj izpustov in s tem okoljsko ugodnejše dolgoročno obratovanje. Manjša poraba goriva se pretvori v manjše izpuste in s tem povezane tako interne kot eksterne okoljske stroške.

Prometno delo, upoštevajoč tako priključke kot vpliv klancev, skupaj znaša 8,32 milijarde prevoženih kilometrov. Od tega

prek 75 % prispevajo avtomobili, skoraj 13 % lahka tovorna vozila (LTV) in dobrih 11 % težka tovorna vozila (TTV). Prispevek avtobusov in drugih vozil je skoraj zanemarljiv. Podrobnejši podatki so na voljo v preglednici 1.

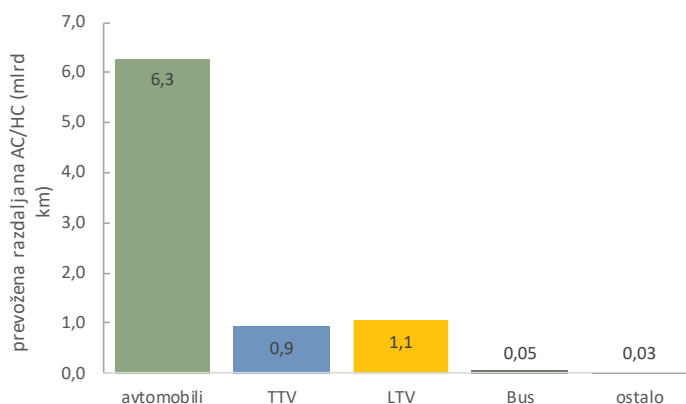
Slika 6 prikazuje skupno prevoženo razdaljo različnih tipov vozil na avto- in hitrih cestah za leto 2023.

3 REZULTATI

Izpusti uporabnikov avto- in hitrih cest v Sloveniji so izračunani iz podatkov o prometnem delu in emisijskih faktorjih. Skupni izpusti CO₂ uporabnikov avto- in hitrih cest v Sloveniji za leto 2023 znašajo 2,0859 milijona ton, izpusti CH₄ znašajo 19,2 tone ter izpusti N₂O 62,5 tone. Izpusti NO_x znašajo 4355,9 tone, pri izpustih PM_{2.5} pa so bili izračunani izpusti zaradi zgorevanja goriv v motorjih (78,4 tone) ter izpusti zaradi obrabe cest, zavor

	vsa vozila	avtomobili	težka tovorna vozila	lahka tovorna vozila	avtobusi	drugo
	milijon prevoženih km					
skupaj AC in HC	8037,2	6061,2	887,3	1025,4	48,8	31,7
priključki	274,3	218,2	22,2	29,7	2,1	2,2
vpliv klancev	11,5	0,0	11,5	0,0	0,0	0,0
skupaj	8323,1	6279,5	921,0	1055,1	50,9	33,8

Preglednica 1. Prometno delo za leto 2023.



Slika 6. Skupna prevožena razdalja različnih tipov vozil na avto- in hitrih cestah za leto 2023.

in gum (PM_{2.5} ostalo), ki so višji od izpustov zaradi zgorevanja (117,2 tone). Preglednica 2 navaja vse izpuste po posameznem tipu vozil.

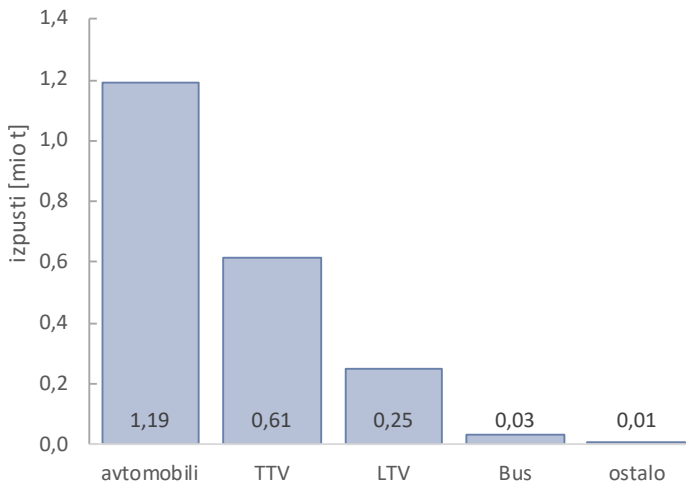
Slika 7 prikazuje letne izpuste CO₂ za posamezne tipe vozil v grafični obliki. Pri izpustih močno prevladujejo osebna vozila, delež težkih tovornih vozil je za približno polovico manjši, delež lahkih tovornih vozil pa še manjši.

Slika 8 prikazuje letne izpuste CH₄, N₂O, NO_x, PM_{2.5} in SO₂ za posamezne tipe vozil. Del delcev PM_{2.5} izvira tudi iz mehanske obrabe zavornih sistemov in pnevmatik. Tudi v tem primeru močno prevladujejo avtomobili, delež lahkih tovornih vozil pa je večji od deleža težkih tovornih vozil.

Primerjava izpustov različnih toplogrednih plinov zahteva upoštevanje njihove relativne potentnosti (tj., vpliva na podnebne spremembe) oziroma faktorje toplogrednega potenciala, ki so povzeti po petem poročilu IPCC o oceni stanja (angl. Fifth Assessment Report) [IPCC, 2020]. Skupni izpusti toplogrednih

Izpusti [kt]	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	TGP	NO _x	PM _{2.5} iz goriv	PM _{2.5} ostalo	SO ₂
avtomobili	1191,3	0,0119	0,0182	1196,5	2,6296	0,0524	0,0567	0,0027
TTV	613,0	0,0050	0,0387	623,4	0,4563	0,0078	0,0450	0,0004
LTV	246,5	0,0002	0,0042	247,6	1,1977	0,0169	0,0138	0,0005
avtobusi	30,1	0,0003	0,0013	30,4	0,0654	0,0010	0,0017	0,0000
drugo	5,0	0,0019	0,0001	5,1	0,0069	0,0002	0,0000	0,0000
Skupaj	2085,9	0,0192	0,0625	2103,0	4,3559	0,0784	0,1172	0,0036

Preglednica 2. Skupni izpusti toplogrednih plinov in onesnaževal zraka uporabnikov avto- in hitrih cest v Sloveniji v letu 2023.



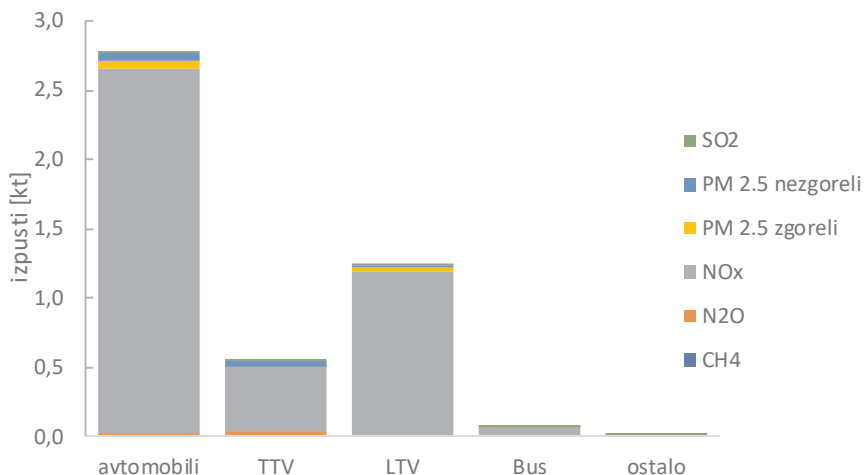
Slika 7. Letni izpusti CO₂ za posamezne tipe vozil.

plinov tako znašajo 2,103 milijona ton CO₂ ekvivalenta, pri čemer je delež CO₂ prek 99 %.

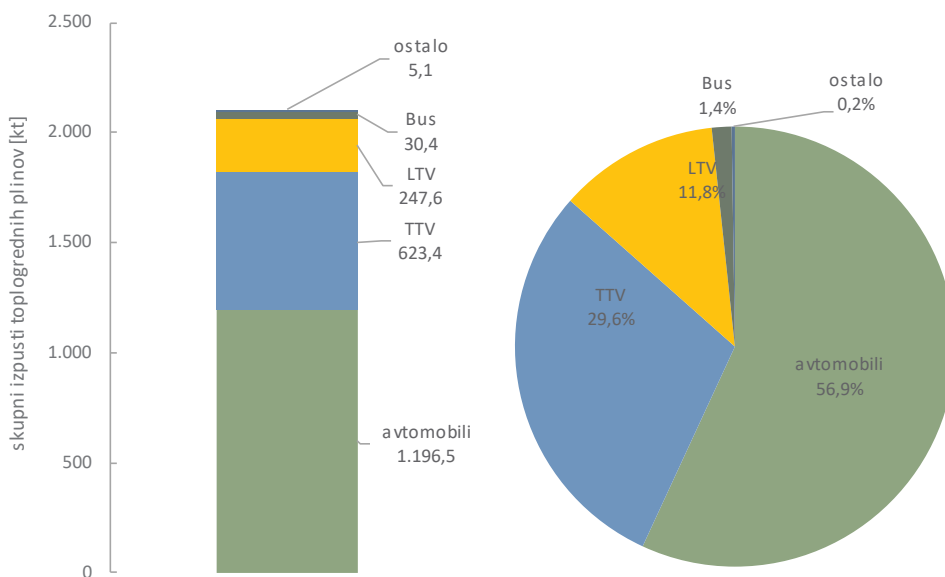
Slika 9 prikazuje izpuste toplogrednih plinov v kt CO₂ ekv. za različne tipe vozil (levo) in njihove deleže (desno). Pri tem so glavni vir izpustov avtomobili z več kot 55 %, težka tovorna vozila prispevajo slabo tretjino, lahka pa le še dobro desetino.

3.1 Primerjava s skupnimi izpusti

Izpuste toplogrednih plinov in onesnaževal zraka uporabnikov avto- in hitrih cest v Republiki Sloveniji je smiselno primerjati s skupnimi izpusti [ARSO, 2025]. Ob tem je smiselno opozoriti, da izpusti v cestnem prometu na nivoju države izhajajo iz količine prodanega goriva v Sloveniji, medtem ko izpusti uporabnikov avto- in hitrih cest izhajajo iz obsega prevoženih kilometrov v avtocestnem omrežju. Prodana količina goriv v Sloveniji ne ustreza porabljeni količini goriv zaradi prevoženih kilome-



Slika 8. Letni izpusti CH₄, N₂O, NO_x, PM_{2,5} in SO₂ za posamezne tipe vozil.



Slika 9. Delež izpustov posameznih tipov vozil v skupnih izpustih.

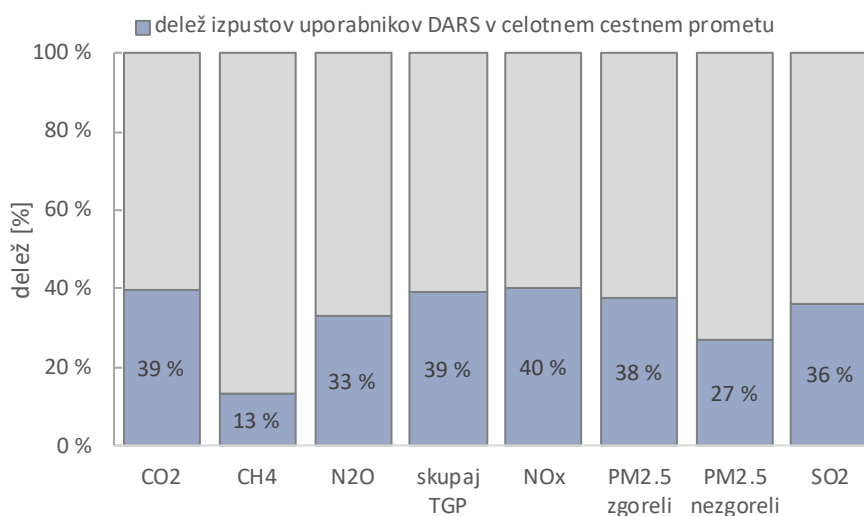
trov po slovenskih cestah, saj lahko vozila z gorivom, kupljenim v Sloveniji, kilometre opravijo tudi v tujini, poleg tega lahko kilometre v Sloveniji opravijo vozila z gorivom kupljenim v tujini. Čeprav to deloma vpliva na rezultate, pa ne spreminja splošne slike vpetosti izpustov uporabnikov sistema DARS v širši okvir problematike izpustov. Slika 10 prikazuje deleže izpustov toplogrednih plinov in onesnaževal zraka uporabnikov avto- in hitrih cest družbe DARS v celotnem cestnem prometu v letu 2023.

Iz podatkov je razvidno, da predstavljajo izpusti uporabnikov avto- in hitrih cest družbe DARS praviloma 30-40 % vseh izpustov v cestnem prometu. Izjema so le izpusti metana, ki dosegajo le 13 %.

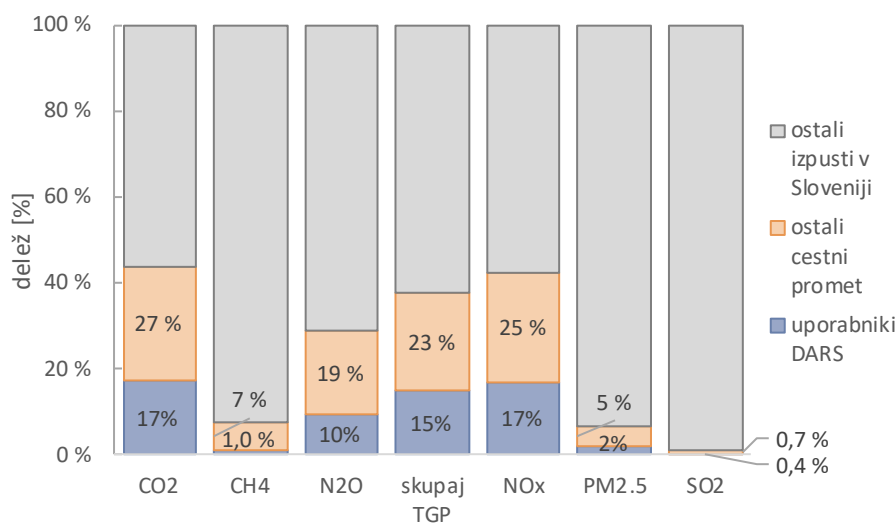
Slika 11 prikazuje deleže izpustov toplogrednih plinov in onesnaževal zraka uporabnikov avto- in hitrih cest družbe DARS glede na vse izpuste v Republiki Sloveniji v letu 2023.

Izračuni izpustov toplogrednih plinov in onesnaževal zraka uporabnikov avto- in hitrih cest družbe DARS kažejo, da so ti velik vir izpustov CO₂ (in s tem toplogrednih plinov) - okoli 15%. Prav tako je pomemben delež NO_x, kjer delež izpustov uporabnikov avto- in hitrih cest predstavlja 17% skupnih izpustov tega onesnaževala zraka.

Podatki o dolžini državnih cest [OPSI, 2023a] kažejo, da avto- in hitre ceste predstavljajo zgolj 3,9 % vseh cest v Sloveniji oziroma 7,5 %, ob upoštevanju števila pasov. Podatki o večjih relativnih izpustih toplogrednih plinov in onesnaževal zraka nakazujejo na večjo prometno obremenitev avto- in hitrih cest v sistemu DARS.



Slika 10. Delež izpustov toplogrednih plinov in onesnaževal zraka uporabnikov avto- in hitrih cest družbe DARS v celotnem cestnem prometu.



Slika 11. Delež izpustov toplogrednih plinov in onesnaževal zraka uporabnikov avto- in hitrih cest družbe DARS glede na vse izpuste v Republiki Sloveniji.

4 POENOSTAVLJEN NAPOVEDNI MODEL

Velika količina prometnih podatkov zahteva njihovo obsežno obdelavo. Zaradi potrebe po hitri oceni gibanja izpustov toplogrednih plinov in onesnaževal zraka uporabnikov avtocestnega sistema v Republiki Sloveniji je za kratkoročne ocene (do nekaj let) smiselno uporabiti poenostavljen pristop. Analiza kaže, da je najvplivnejši parameter za spremembo izpustov rast količine prometa, pri čemer prevladujejo avtomobili (v enačbah (4)-(6) označeni z indeksom A) in tovorna vozila (indeks TV). Oceno izpustov toplogrednih plinov za naslednje leto (izpusti TGP_{n+1}) je mogoče izračunati s poenostavljeno implementacijo Eulerjeve metode na podlagi predhodnih izpustov (izpusti TGP_n) in rasti prometa (rast):

$$\text{izpusti } TGP_{n+1} = \text{izpusti } TGP_{A,n+1} + \text{izpusti } TGP_{TV,n+1} \quad (4)$$

$$\text{izpusti } TGP_{A,n+1} = \text{izpusti } TGP_{A,n} \cdot (1 + \text{rast}_A) \quad (5)$$

$$\text{izpusti } TGP_{TV,n+1} = \text{izpusti } TGP_{TV,n} \cdot (1 + \text{rast}_{TV}) \quad (6)$$

Podatke o rasti prometa avtomobilov rast_A in rasti prometa tovornih vozil rast_{TV} lahko pridobimo bodisi iz podatkov reprezentativnih števecv prometa bodisi iz podatkov sistema DarsGo. Po izkušnjah so spremembe emisijskih faktorjev razmeroma postopne, pri čemer se izračunajo z zamikom za več let nazaj.

Verifikacijo modela smo izvedli glede na podatke iz leta 2022, ko so izpusti toplogrednih plinov uporabnikov avto- in hitrih cest znašali 2061,9 kt CO₂ ekv. Skupni promet na avto- in hitrih cestah se je v letu 2023 v primerjavi z letom 2022 povečal za 2,0 %, pri čemer je bila rast glede na cestninske kategorije različna, od 0,3 % za vlačilce, prek 1,5 % za osebna vozila in do 10,3 % za težje tovornjake. Z upoštevanjem metodologije, predstavljene v poglavju 2, so skupni izpusti v letu 2023 znašali 2103,01 kt CO₂ ekv, pri uporabi poenostavljenega modela pa 2096,2 kt CO₂ ekv. Razlika v rezultatih obeh pristopov znaša 0,3 %, kar kaže na ustreznost poenostavljenega modela.

Za leto 2024 je znašala rast avtomobilskega prometa 2,9 %, rast tovornega prometa pa 0,6 %. Ob upoštevanju deležev avtomobilskega in tovornega prometa 65,7 % in 34,3 % ter izhodiščnih izpustov toplogrednih plinov za leto 2023 znaša ocena izpustov za leto 2024 2143,20 kt CO₂ ekv.

5 RAZPRAVA

Predstavljeni model izračuna izpustov TGP in onesnaževal zraka predstavlja pomemben korak v sistematičnem spremljanju in upravljanju izpustov na avtocestnem sistemu. Povezava realnih podatkov s preverjenimi emisijskimi faktorji potrjuje ključne predpostavke o okoljski obremenitvi cestnega prometa. Hkrati omogoča kakovostno osnovo za poročanje po direktivi CSRD, s čimer zadostuje tovrstnim zahtevam družbe DARS. Poseben poudarek na količini prometa omogoča identifikacijo ključnih odsekov za ukrepanje. Metodologija izračuna, ki združuje podatke števecv z emisijskimi faktorji modela COPERT, je izkazala visoko uporabnost in prilagodljivost. Pomembne so tudi prepoznane omejitve orodja COPERT, ki temelji na standardiziranih emisijskih faktorjih. Ti ne zajemajo nekaterih lokalnih posebnosti, kot so mikroklima, lokalni zastoji ali strmi cestni odseki, kar je bilo delno upoštevano z dodatnimi korekcijskimi

faktorji (npr. za vožnjo težkih tovornih vozil v klanec). Pomanjkljivost modela je pri ocenjevanju prometa na priključkih, kjer neposredni podatki manjkajo in je potrebna ustrezna inženirska presoja. Primerjava modeliranih rezultatov s statističnimi podatki (npr. porabo goriva po prometnem sektorju) kaže na dobro skladnost, kar potrjuje uporabnost razvite metodologije

Tako je ugotovljeno, da slovenski avtocestni sistem kljub velikim količinam prometa izkazuje nižje izpuste toplogrednih plinov in onesnaževal zraka na prevoženi kilometer v primerjavi z regionalnimi in mestnimi cestami, predvsem zaradi enakovrednejših hitrosti ter manj pogostih zaustavitev in speljevanj. Čim bolj nemoten prometni tok je sicer temeljna prometna paradigma avto- in hitrih cest, vendar je ustrezna kvantifikacija količine prometa in izpustov pomembna pri analizi sprememb na tovrstnem cestnem omrežju (npr. z gradnjo dodatnih pasov in priključkov).

Izvedena analiza potrjuje, da ima uporaba slovenskega avtocestnega omrežja pomemben delež pri izpustih toplogrednih plinov, zlasti zaradi visokih obremenitev z osebnim in tovrnim prometom. Rezultati so pokazali, da je skupna količina izpustov na avtocestah leta 2023 znašala 2103,0 kt CO₂ ekv, kar predstavlja pomemben delež celotnih izpustov iz cestnega prometa v Sloveniji. Analiza je tudi pokazala, da številčno relativno majhen delež težkih tovornih vozil povzroči skoraj tretjino vseh izpustov na avtocestnem omrežju. Dodatno povečanje porabe goriva zaradi cestnih naklonov kaže, da so lokalne geografske razlike pomemben dejavnik, ki ga je treba vključevati v modeliranje.

Predlagan je bil tudi poenostavljen model napovedovanja izpustov toplogrednih plinov in onesnaževal zraka, ki temelji na rasti količine avtomobilskega in tovornega prometa na avto- in hitrih cestah. Ocenjujemo, da je takšen pristop dovolj natančen za srednjeročno obdobje (tri leta), kasneje je zaradi sprememb v pogonskih sistemih in relativnih prometnih obremenitvah smiselno preveriti in morebiti prilagoditi predpostavke tovrstnega modela.

Potencial za nadgradnjo vključuje obravnavo dinamike zastojev in napovedi vpliva ukrepov za zmanjšanje izpustov (npr. spremembe omejitve hitrosti ali spodbujanje multimodalnega prevoza). Analiza lahko vključuje tudi podatke o vremenu in nesrečah. Nadaljnja uporabnost modela je tudi preizkušanje scenarijev za trajnostno preusmerjanje tovornega prometa, kot so na primer navedeni v Celovitem nacionalnem energetskem in podnebnem načrtu Republike Slovenije (NEPN) in drugih strateških dokumentih.

6 ZAHVALA

Za podatke, uporabljene v analizi, se avtorja zahvaljujema podjetju DARS, d. d., Prav tako gre zahvala dr. Tomažu Vidicu, mag. Jožetu Knezu in dr. Petru Gašperšiču za dodatne konzultacije in pojasnila.

7 LITERATURA

ARSO. Izpusti toplogrednih plinov | Okoljski kazalci. Agencija Republike Slovenije za okolje, <https://kazalci.arso.gov.si/sl/content/izpusti-toplogrednih-plinov-12>, 2025.

- Asfinag, Roads to Sustainable Mobility: Sustainability Report (Sustainability Report) (p. 160). Asfinag, https://www.asfinag.at/media/hpujhoce/asfinag_nachhaltigkeitsbericht_2021_engl.pdf, 2021.
- CSRD, Corporate Sustainability Reporting Directive. Directive (EU) 2022/2464, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj/eng>, 2022.
- Die Autobahn, Nachhaltigkeitsbericht 2022 (Nachhaltigkeitsbericht) (p. 64). Die Autobahn, 2022.
- Domagala, J., Kadłubek, M., Economic, Energy and Environmental Efficiency of Road Freight Transportation Sector in the EU, *Energies*, 16(1), 461, <https://doi.org/10.3390/en16010461>, 2023.
- DRSI, Cestna infrastruktura. Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo. Ministrstvo za infrastrukturo, <https://www.gov.si teme/cestna-infrastruktura/>, 2024.
- EEA, (, October 31), Greenhouse gas emissions from transport in Europe, Retrieved August 29, 2025, from <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport>, 2024.
- GHG Protocol, Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard - Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard. Washington DC, ZDA, https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf, 2023.
- Gnap, J., Šarkan, B., Konečný, V., Skrúcaný, T., The Impact of Road Transport on the Environment, In A. Śładkowski (Ed.), *Ecology in Transport: Problems and Solutions* (pp. 251-309). Cham: Springer International Publishing, https://doi.org/10.1007/978-3-030-42323-0_5, 2020.
- IPCC, National Greenhouse Gas Inventories Programme. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>, 2006.
- IPCC, Climate Change 2014 Synthesis Report Fifth Assessment Report: Summary for Policymakers (Synthesis Report). Intergovernmental Panel on Climate Change, https://ar5-syr.ipcc.ch/topic_summary.php, 2020.
- ISO, Greenhouse gases – Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations (Version 1). International Organization for Standardization, <https://www.iso.org/standard/78864.html>, 2023.
- JRC, Modelling Inventory and Knowledge Management System of the European Commission (MIDAS). Computer model to calculate emissions from road traffic. Joint Research Center, <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-copert/>, 2014.
- Kazancoglu, Y., Ozbiltekin-Pala, M., Ozkan-Ozen, Y. D., Prediction and evaluation of greenhouse gas emissions for sustainable road transport within Europe, *Sustainable Cities and Society*, 70, 102924, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102924>, 2021.
- Kegljevič Zagorc, L., TRAJNOSTNI RAZVOJ IN SPREMEMBE V GRADBENIŠTVU. SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND CHANGES IN THE CONSTRUCTION. *Gradbeni Vestnik*, 68, 195-200, 2019.
- Lipar, P. in dr., Prometni podatki: Pregled posameznih baz in potreb ter metodologija (No. 24/2018) (p. 51). Ljubljana, Slovenija: Prometnotehniški inštitut, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, 2018.
- Nkesah, S. K., Making road freight transport more Sustainable: Insights from a systematic literature review, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 22, 100967, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100967>, 2023.
- Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C., Samaras, Z., COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model, In I. N. Athanasiadis, A. E. Rizzoli, P. A. Mitkas, & J. M. Gómez (Eds.), *Information Technologies in Environmental Engineering* (pp. 491-504). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-540-88351-7_37, 2009.
- Ntziachristos, L., Samaras, Z., EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023: Technical guidance to prepare national emission inventories (No. EEA Report 06/2023). Copenhagen, Danska: European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023>, 2023.
- Olivari, E., Caballini, C., Lluch, X., How to calculate GHG emissions in freight transport? A review of the main existing online tools, *Case Studies on Transport Policy*, 19, 101343, <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2024.101343>, 2025.
- OPSI, (a), Dolžine državnih cest in E-cest po občinah in regijah od leta 1990 dalje, OPSI - Odprti podatki Slovenije. Ministrstvo za infrastrukturo, Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo, <https://podatki.gov.si/dataset/dolzine-drzavnih-cest-po-obcinah/resource/dc40c782-c7ab-464e-8815-5c3ffec33831>, 2023.
- OPSI, (b), Evidenca registriranih vozil - presek stanja, po letih. OPSI - Odprti podatki Slovenije. Ministrstvo za infrastrukturo, <https://podatki.gov.si/dataset/evidenca-registriranih-vozil-presek-stanja>, 2023.
- Roukounakis, N., Valkouma, E., Giama, E., Gerasopoulos, E., The development of a carbon footprint model for the calculation of GHG emissions from highways: the case of Egnatia Odos in Greece, *International Journal of Sustainable Transportation*, 14(1), 74-83, <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1523509>, 2020.
- Storebælt, Storebæltforbindelsen Baeredygtighedsrapport 2022 (Baeredygtighedsrapport). Storebælt, <https://publications.sundogbaelt.dk/baeredygtighedsrapport/storebaelt-baeredygtighedsrapport-2022-finalpdf/>, 2022.
- T&E, The State of European Transport 2024 (p. 12). Transport&Environment, <https://www.transportenvironment.org/state-of-european-transport/state-of-transport>, 2024.
- Travesset-Baro, O., Rosas-Casals, M., Jover, E., Transport energy consumption in mountainous roads. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 16-26, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.09.006>, 2015.
- Zhou, M., Jin, H., Ding, F., Minimizing vehicle fuel consumption on hilly roads based on dynamic programming, *Advances in Mechanical Engineering*, 9(5), 168781401769411, <https://doi.org/10.1177/1687814017694116>, 2017.