

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Utjecaj uvođenja ekološke zone na  
emisiju štetnih tvari cestovnih motornih  
vozila u Gradu Zagrebu**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing. stroj.

Studenti:

Marko Bunjevac

Matija Pečet

Filip Slatina

Martina Šimag

Valentina Vizir

Zagreb, svibanj 2018.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za motore i vozila, Zavoda za transportna sredstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom prof. dr. sc. Zorana Lulića i predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017/2018.

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	II
POPIS OZNAKA .....	III
POPIS KRATICA .....	III
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	V
1. UVOD .....	1
1.1. EMISIJE ŠTETNIH TVARI I UTJECAJ NA ZDRAVLJE LJUDI.....	1
1.2. OPĆENITO O EKOLOŠKIM ZONAMA .....	3
1.2.1. POVIJEST EKOLOŠKIH ZONA.....	3
1.2.2. EKOLOŠKE ZONE U EUROPSKIM DRŽAVAMA.....	4
2. HIPOTEZA .....	9
3. PLAN RADA .....	10
3.1. DEFINIRANJE EKOLOŠKE ZONE.....	11
3.2. DEFINIRANJE MAKSIMALNOG KAPACITETA PROMETNICE.....	12
3.3. ODREĐIVANJE BROJA VOZILA NA PROMETNICAMA.....	13
3.4. KAPACITETI PROMETNICA.....	15
3.5. STRUKTURA VOZILA .....	17
3.6. DEFINIRANJE SCENARIJA .....	19
3.7. IZRAČUN ŠTETNE EMISIJE PROGRAMOM <i>COPERT: STREET LEVEL</i> .....	22
4. REZULTATI.....	24
4.1. EMISIJA ŠTETNIH TVARI IZ PROMETA .....	24
5. RASPRAVA .....	27
6. ZAKLJUČAK .....	30
LITERATURA.....	31
ZAHVALA.....	33
SAŽETAK.....	34
SUMMARY .....	35

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
$a$	m	Sigurnosni razmak između vozila u kretanju
$a_r$	m	Duljina puta reagiranja
$a_s$	m	Sigurnosni razmak nakon zaustavljanja
$C$	voz/h	Propusna moć prometnog traka
$n$	-	Broj prometnih trakova
$t_r$	s	Vrijeme reakcije vozača
$V$	km/h	Brzina vozila
$\gamma$	-	Koeficijent redukcije propusne moći

## POPIS KRATICA

Kratika	Opis kratice
CVH	Centar za vozila Hrvatske
EUR	Euro, €
PM	Krute čestice (engl. <i>Particulate Matter</i> )
LDV	Laka gospodarska vozila (engl. <i>Light Duty Vehicle</i> )
CNG	Stlačeni prirodni plin (engl. <i>Compressed Natural Gas</i> )
WHO	Svjetska zdravstvena organizacija (engl. <i>World Health Organisation</i> )
HDV	Teška gospodarska vozila (engl. <i>Heavy Duty Vehicle</i> )
LPG	Ukapljeni naftni plin (engl. <i>Liquefied Petrol Gas</i> )

## POPIS SLIKA

Slika 1. Dijagram toka proračuna.....	10
Slika 2. Ekološka zona .....	11
Slika 3. Prometnice obuhvaćene proračunom .....	11
Slika 4. Početna točka za određivanje broja vozila na prometnicama .....	13
Slika 5. Određivanje broja vozila prema maksimalnom kapacitetu prometnice.....	14
Slika 6. Primjer zatvorenog čvora .....	14
Slika 7. Primjer otvorenog čvora.....	15
Slika 8. Raspodjela broj vozila na prometnicama unutar ekološke zone .....	16
Slika 9. Struktura vozila prema vrsti pogonskog goriva .....	17
Slika 10. Raspodjela vozila pogonjenih benzinom prema emisijskim standardima .....	18
Slika 11. Raspodjela vozila pogonjenih dizelskim gorivom prema emisijskim standardima ..	18
Slika 12. Nova struktura vozila pogonjenih benzinom .....	19
Slika 13. Nova struktura vozila pogonjenih dizelskim gorivom .....	19
Slika 14. Trenutačna struktura vozila (puna linija) i nova struktura vozila (crtkana linija) ....	20
Slika 15. Promjena strukture vozila prema pogonu .....	20
Slika 16. Rezultati izračuna ukupne emisije štetnih tvari i ugljikovog dioksida .....	24
Slika 17. Rezultati izračuna ukupne emisije ugljikova dioksida.....	25
Slika 18. Usporedba smanjenja emisije štetnih tvari prvim i drugim scenarijem .....	26
Slika 19. Prekoračenja dopuštenih granica emisije NO <sub>x</sub> (40 µg/m <sup>3</sup> ) [19] .....	28

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Odnos broja prometnih trakova i koeficijenta redukcije propusne moći .....	12
Tablica 2. Pregled svih scenarija.....	21
Tablica 3. Prikaz emisijskih faktora za 50 km/h u ovisnosti o vrsti goriva i starosti vozila....	22

## 1. UVOD

Prema izvješćima Europske agencije za zaštitu okoliša (EEA), oko 30 % svih emisija CO<sub>2</sub> dolazi iz prometa [1]. Onečišćenje zraka predstavlja sve značajniji problem za okoliš i zdravlje ljudi. Jedan od glavnih onečišćivača zraka je promet. Štetne tvari (ispušni plinovi i čestice) koje nastaju kao produkt izgaranja u motorima s unutarnjim izgaranjem uzrokuju bolesti dišnog sustava, kardiovaskularne te neurološke bolesti [2]. Istraživanje koje je provedeno u Njemačkoj na temu utjecaja emisija štetnih tvari iz kopnenog prometa na klimatske promjene pokazalo je da su tijekom 21. stoljeća emisije štetnih tvari iz njemačkog cestovnog prometa pridonijele povećanju srednje globalne površinske temperature (eng. *global mean surface temperature*) za 10 mK [3].

S ciljem smanjenja onečišćenosti zraka, Europska Unija je 21. svibnja 2008. godine donijela Direktivu 2008/50/EC o kvaliteti i čistoći zraka za Europu. Direktivom se zahtijeva primjena najučinkovitijih mjera smanjenja emisije na lokalnoj i nacionalnoj razini i njome su određene granične vrijednosti štetnih tvari u zraku [4].

### 1.1. EMISIJE ŠTETNIH TVARI I UTJECAJ NA ZDRAVLJE LJUDI

Osnovne produkte izgaranja koji nastaju u motorima s unutarnjim izgaranjem mogu se podijeliti na štetne i one koji nisu štetni na ljudsko zdravlje. Ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>), kisik, dušik i vodena para nisu štetni, dok su ugljikov monoksid (CO), neizgorijeli ugljikovodici (HC), dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>) i krute čestice (PM) štetne. Emisija štetnih tvari iz cestovnih motornih vozila u okoliš ograničena je „Euro“ emisijskim standardima. Euro emisijski standardi uvedeni su 1992. godine, a trenutno je na snazi emisijski standard Euro 6 (od rujna 2014. godine).

Ugljikov monoksid (CO) plin je bez boje i mirisa koji nastaje nepotpunim izgaranjem krutih, tekućih i plinovitih goriva na bazi ugljika. Opasan je za ljude jer njegovim udisanjem može doći do trovanja. Naime, hemoglobin koji se nalazi u crvenim krvnim stanicama, na sebe znatno brže veže ugljikov monoksid nego kisik, čime je spriječena normalna opskrba stanica kisikom. Prvi simptomi trovanja primjećuju se kad je koncentracija ugljikovog monoksida u zraku iznad 70 ppm, dok su već i niže koncentracije opasne za srčane bolesnike.

Dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>) nastaju oksidacijom atmosferskog dušika u pravilu pri temperaturama višim od 1800 K [5]. Dijele se na dušikov monoksid (NO) i dušikov dioksid (NO<sub>2</sub>). Dušikov monoksid oksidacijom u atmosferi prelazi u dušikov dioksid koji u daljnjim kemijskim procesima dovodi do stvaranja kiselih kiša. Također, dušikovi oksidi uzrokuju stvaranje štetnog

prizemnog ozona. Osim nepovoljnog utjecaja na okoliš, dušikovi oksidi imaju i negativan utjecaj na zdravlje ljudi. Uzrokuju nadraženost očiju i dišnih putova, umor i mučninu. Kod dugotrajne izloženosti postoji opasnost od pojave astme te trajnog oštećenja pluća i živčanog sustava, a mogu čak uzrokovati i genetska oštećenja. Također, kao i ugljikov monoksid, onemogućuju normalan prijenos kisika krvlju [6].

Krute čestice (PM) najvećim se dijelom sastoje od čađe. Prema prosječnom promjeru dijele se na PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub>. PM<sub>10</sub> su čestice čiji je aerodinamički promjer manji od 10 mikrometara, a PM<sub>2,5</sub> one kod kojih je promjer manji od 2,5 mikrometra. Takve fine krute čestice posebno su opasne za ljudsko zdravlje jer vrlo lako prodiru u pluća i krvotok [7]. Dokazano je da čestice povećavaju smrtnost zbog kronične opstruktivne plućne bolesti, ishemijske bolesti srca i karcinom pluća [8].

Ugljikovodici (HC) nastaju prilikom nepotpunog izgaranja. Posebno su opasni aromatski ugljikovodici, među kojima se ističe benzen (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>). Benzen je na sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku bezbojna lakohlapljiva tekućina karakterističnog mirisa čije su pare iznimno toksične. Kod trovanja benzenom javljaju se glavobolje, zamagljen vid, poremećaji rada srca i bubrega, oštećenje jetre, psihološke smetnje i dr. [9].

Ugljikov dioksid je staklenički plin koji ne utječe izravno na ljudsko zdravlje, ali nepovoljno utječe na efekt staklenika. Naime, povećanje koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi dovodi do promjena temperature, količine oborina i drugih klimatoloških elemenata. [10]

Prostor na kojem se produkti izgaranja iz motora s unutarnjim izgaranjem rasprostiru ovisi o vrsti emisija. Štetne tvari nastale izgaranjem ostaju u blizini izvora, odnosno u krugu od nekoliko desetaka kilometara dok se staklenički plinovi akumuliraju u atmosferi. Kako danas većina stanovništva živi u gradovima u kojima je koncentriran i promet, gradska središta postaju žarišta onečišćenja.



S ciljem smanjenja emisija navedenih štetnih ispušnih tvari, posebno finih krutih čestica (PM) i dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>), neke europske zemlje, odnosno gradovi, uvele su zone s ograničenjem upotrebe pojedinih kategorija vozila poznatije kao ekološke zone (engl. *low emission zones*). Cilj tih ograničenja jest na određenom području, odnosno u nekoj gradskoj zoni, ograničiti promet vozila s visokim emisijama štetnih tvari.

## **1.2. OPĆENITO O EKOLOŠKIM ZONAMA**

U širem smislu, ekološke zone (engl. *Low Emission Zones*, njem. *Umweltzonen*, šved. *Miljözon*, fr. *ZTL ambiente*) su područja u kojima je ograničeno prometovanje za vozila koja ne zadovoljavaju traženi emisijski standard. Pod ograničenjem se podrazumijeva potpuna zabrana ili naplaćivanje ulaska vozila u ekološke zone. Ekološke zone mogu obuhvaćati nekoliko glavnih prometnica ili cjelokupni centar grada. Uvedene su u područjima u kojima je razina onečišćenja zraka predstavlja značajnu opasnost za zdravlje ljudi. Budući da najveću opasnost predstavljaju krute čestice i dušikovi oksidi, čija je emisija veća kod vozila s Diesellovim motorom, ekološke zone strože su prema vozilima s Diesellovim motorom. Tako, primjerice, teška gospodarska vozila (HDV) koja uglavnom imaju Diesellove motore, ispuštaju do 30 puta više PM<sub>2,5</sub> i 26 puta više NO<sub>x</sub> u odnosu na laka teretna vozila (LDV) [11]. Stoga je najčešće takvim vozilima ulazak u ekološke zone zabranjen, odnosno na neki način reguliran.

Osim što onečišćenje zraka nepovoljno utječe na zdravlje ljudi, ono uzrokuje i velike novčane gubitke. Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) tvrdi da je onečišćenje zraka odgovorno za preranu smrt gotovo 310.000 ljudi u Europi, kao i da onečišćenje zraka uzrokuje više smrtnih slučajeva nego prometne nesreće. Trošak Europskog gospodarstva za liječenje ljudi oboljelih od posljedica onečišćenja zraka varira od 427 do 790 milijardi EUR godišnje. [12].

### **1.2.1. POVIJEST EKOLOŠKIH ZONA**

Prve ekološke zone uvedene su 1999. u Švedskoj u gradovima Stockholm, Göteborg i Malmö. Starim, teškim gospodarskim vozilima bio je zabranjen ulazak u ekološke zone, a srednje stara vozila morala su biti opremljena s certificiranim uređajima za smanjenje emisija ili ugrađenim novijim motorima. Švedska Vlada je 2006. godine osmislila nacionalni plan ekoloških zona.

Prva ekološka zona uvedena izvan Švedske obuhvaćala je područje tunela Mont Blanc između Francuske i Italije, gdje su zabranu ulaska imala teška gospodarska vozila koja nisu zadovoljavala Euro 3 emisijski standard.

## **1.2.2. EKOLOŠKE ZONE U EUROPSKIM DRŽAVAMA**

Sve ekološke zone zabranjuju ulazak teškim gospodarskim vozilima s visokim emisijama, dok neke ekološke zone zabranjuju ulazak autobusima, automobilima i motociklima. Većina ekoloških zona djeluje kroz cijelu godinu, dok neki oblici ekoloških zona uvode povremene zabrane prometa, npr. za vrijeme najvećih gužvi, zimi, ljeti, itd.. Trenutno je u Europi uvedeno 258 ekoloških zona [12].

### **1.2.2.1. UJEDINJENO KRALJEVSTVO**

Ekološke zone u Londonu počele su se uvoditi 2008. godine, a prema površini područja koje obuhvaćaju (1500 km<sup>2</sup>), one predstavljaju najveće zone u svijetu. One su potpune zone što znači da nema prekida u njihovom radu. Pri ulasku u ekološke zone nalaze se kamere koje koriste tehnologiju automatskog prepoznavanja registarskih oznaka. Uvođenje ekoloških zona u London odvijalo se u nekoliko faza [13]:

1. 2008. zabranjen je ulazak motornim vozilima z prijevoz tereta čija je najveća dopuštena masa veća od 3,5 t s emisijskim standardom manjim od Euro 3.
2. 2012. zabranjen je ulazak velikim kombijima, kamper vozilima, kamionetima, vozilima hitne pomoći čija je najveća dopuštena masa veća od 2,5 t, minibusima, autobusima s emisijskim standardom manjim od Euro 3.
3. 2015. zabranjen je ulazak autobusima (Transport for London) s emisijskim standardom manjim od Euro 4.
4. Do 2020. planira se zabrana ulaska u ekološku zonu u centru Londona svim vozilima s emisijskim standardom manjim od Euro 5.

Istraživanja su pokazala da je nakon uvođenja ekoloških zona došlo do smanjenja onečišćenja zraka, odnosno poboljšanja kvalitete zraka. Do značajnijeg poboljšanja došlo je u područjima gdje se odvija velik promet teretnih vozila [14].

### **1.2.2.2. NJEMAČKA**

Njemačka je 2007. započela s nacionalnim planom za uvođenje ekoloških zona. Za ulazak u ekološku zonu vozilo mora imati istaknuti ekološku naljepnicu na vidljivom mjestu na

vjetrobranskom staklu. Provjeru ulaska vozila u ekološke zone obavlja policija. Postoje tri vrste ekoloških naljepnica: zelena, crvena i žuta.

Zelena ekološka naljepnica ukazuje da vozilo koje ima Dieslov motor zadovoljava emisijski standard Euro 4 ili Euro 3 ukoliko je opremljen filtrom čestica, a vozilo koje ima Ottov motor zadovoljava emisijski standard Euro 1. Sva vozila s Dieslovim motorom proizvedena prije 2000. imaju zabranu ulaska u ekološke zone koje zahtijevaju zelenu ekološku naljepnicu.

Žuta ekološka naljepnica namijenjena je za vozila koja imaju Dieslov motor, a koja zadovoljavaju emisijski standard Euro 3 ili Euro 2 ukoliko su opremljena filtrom čestica te za vozila proizvedena 1996. ili kasnije.

Crvena ekološka naljepnica također je namijenjena za vozila koja imaju Dieslov motor te zadovoljavaju emisijski standard Euro 2 ili Euro 1 ukoliko su opremljena filtrom čestica te za vozila proizvedena 1992. ili kasnije.

Ekološka naljepnica obavezna je za sva osobna i teretna vozila te autobuse i kampere registrirane u Njemačkoj ili u inozemstvu. Iz sustava ekoloških naljepnica izuzeti su traktori, radni strojevi i motocikli.

Tijekom svjetske ekonomske krize 2009. i 2010., Njemačka Vlada sufinancirala je zamjenu automobila starijih od 9 godina za nove u iznosu od 2500 EUR [15]. Ovakav oblik poticaja doveo je do bržeg razvoja modernijeg i novijeg voznog parka u Njemačkoj.

Prva ekološka zona u Njemačkoj uvedena je u Berlinu. Područje obuhvaća centar Berlina površine 88 km<sup>2</sup>, odnosno 10 % od ukupne površine grada. Ekološka zona 1. razine, u koju su smjela ući vozila s zelenom, žutom i crvenom ekološkom naljepnicom bila je uvedena 2008. godine, a aktualna 2. razina, gdje je dopušten ulazak vozilima s zelenom ekološkom naljepnicom, uvedena je 2010. godine.

Grad München uveo je ekološku zonu 1. razine 2008. godine površine 44 km<sup>2</sup>, odnosno 14 % od ukupne površine Münchena. U 1. razinu smjela su ući vozila s zelenom, žutom i crvenom ekološkom naljepnicom. 2. razina ekološke zone (zelena i žuta ekološka naljepnica) bila je uvedena 2010. godine, a aktualna razina ekološke zone (zelena ekološka naljepnica) uvedena je 2012. godine.

Bremen, Hannover, Düsseldorf, Frankfurt am Main, Leipzig, Essen, Stuttgart neki su od njemačkih gradova koji su također uveli ekološke zone. Trenutno je u Njemačkoj uvedeno 60 ekoloških zona.

Osim navedenih, u planu je uvođenje i tzv. plavih ekoloških zona. Plave ekološke zone su zone zabrane prometovanja za vozila s Dieselovim motorom u svrhu dodatnog smanjenja visokih emisija štetnih dušikovih oksida koje u nekim gradovima u velikoj mjeri premašuju zakonske granične vrijednosti. Očekuje se uvođenje plavih ekoloških zona u određenim dijelovima središta Berlina, kao što su Leipziger Straße, glavne ulice Neukölln i Hardenbergplatz pored Zoološkog vrt, gdje je kvaliteta zraka izrazito narušena. Također i ostali gradovi (Hamburg, München, Osnabrück, Leipzig, Dresden, Stuttgart) planiraju uvođenje plave ekološke zone.

Istraživanja su pokazala da se uvođenjem ekoloških zona postiglo smanjenje koncentracija PM<sub>10</sub> u iznosu od 5 do 15 %. Druga istraživanja pokazala su da se zbog smanjenja koncentracije PM<sub>10</sub> smanjio i broj preuranjenih smrti povezanih sa onečišćenjem zraka [16].

Također, uvođenje ekoloških zona imalo je utjecaj na koncentraciju NO<sub>2</sub> koja je bila manja od 2 µg/m<sup>3</sup> [15]. Uvođenjem ekoloških zona došlo je i do smanjenja koncentracije PM<sub>2,5</sub> za 60 % [17].

### **1.2.2.3. NIZOZEMSKA**

Nizozemska je 2008. godine započela s nacionalnim planom uvođenja ekoloških zona u kojima je ograničen promet za teška gospodarska vozila (>3,5 t), a od 2011. godine ograničenje obuhvaća i laka teretna vozila. Teška gospodarska vozila moraju zadovoljiti emisijski standard Euro 3, a od 2013. nalaže se zadovoljavanje i Euro 4 standarda. Godina proizvodnje lakih teretnih vozila mora biti nakon 1. siječnja 2001. Vozilima koja ne zadovoljavaju uvjete za ulazak, dopušteno je 12 ulazaka godišnje u ekološku zonu.

Amsterdam započinje 2008. godine s pokusnim uvođenjem ekoloških zona bez kažnjavanja, no već od 2009. godine zabranjen je ulazak teškim gospodarskim vozilima koja ne zadovoljavaju emisijski standard Euro 3. Od 2010. godine se zabrana odnosi i na sva vozila koja ne zadovoljavaju emisijski standard Euro 3, kao i vozila bez filtrom čestica. Kao i u Londonu, koriste se kamere koje primjenjuju tehnologiju automatskog prepoznavanja registarskih oznaka.

Ispitivanja kvalitete zraka u ekološkoj zoni Amsterdama prije i nakon uvođenja ekoloških zona utvrđeno je da je došlo do drastičnog smanjenja koncentracija NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, nakon čega su se vrijednosti ustabilile te nije došlo do daljnjeg poboljšanja [18].

#### **1.2.2.4. DANSKA**

Ekološke zone u Danskoj uvedene su 1. studenog 2011. u gradovima Aalborg, Aarhus, Copenhagen i Odense. Ulazak u ekološku zonu dopušten je vozilima koja na vjetrobranskom staklu imaju vidljivo istaknutu ekološku naljepnicu. Razlikuju se dvije ekološke naljepnice: zelena i crvene.

Zelena ekološka naljepnica obavezna je samo za kamione i autobuse koji zadovoljavaju emisijski standard Euro 4 ili Euro 3 ako su opremljeni filtrom čestica.

Crvena ekološka naljepnica obavezna je za kamione i autobuse koji zadovoljavaju Euro 2 ili Euro 1, ako su opremljeni filtrom čestica. Vozila s istaknutom crvenom ekološkom naljepnicom mogu iznimno ulaziti u ekološke zone, ali prije ulaska treba zatražiti odobrenje od nadležnog tijela.

#### **1.2.2.5. BELGIJA**

Ekološke zone u Belgiji uvedene su 2017. godine u Antwerpenu i Brusselsu, a u Mechelenu i Wittenbroeku uvedene su 2018. godine. Kod registracije vozila, vozilo se svrstava u neki od tri registracijska razreda. Na temelju registracijskog razreda dobiva ekološku naljepnicu određene boje.

Vozilo s registracijskim razredom 4 dobiva ekološku naljepnicu ljubičaste boje. Vozilu je dozvoljen ulazak u ekološke zone. Registracijski razred 4 obuhvaća vozila s Ottovim motorom, vozila na LPG ili prirodni plin koja najmanje zadovoljava emisijski standard Euro 1 te vozila s Dieselovim motorom koji zadovoljavaju emisijski standard Euro 4. U ovaj registracijski razred također su uključena i poljoprivredna vozila (T1-T4 razred), električna vozila, vozila pogonjena vodikom i hibridna vozila s najvećom emisijom CO<sub>2</sub> do 50 g/km.

Vozilo s registracijskim razredom 3 dobiva ekološku naljepnicu žute boje. Vozilu je dozvoljen ulazak u ekološke zone, ali samo tijekom određenog razdoblja u godini. Registracijski razred 3 obuhvaća vozila s Dieselovim motorom koji zadovoljava emisijski standard Euro 3, te povijesna vozila starija od 40 godina.

Vozilo s registracijskim razredom 2 dobiva ekološku naljepnicu crvene boje. Vozilu je dozvoljen dnevni ulazak u ekološke zone. Taj razred obuhvaća vozila s Dieselovim motorom

koji zadovoljavaju emisijski standard Euro 2 i vozila s Ottovim motorom emisijskog standarda Euro 0.

Trenutno je u planu uvođenje zabrane ulaska u ekološke zone vozilima s Diesellovim motorom emisijskog standarda Euro 1.

#### **1.2.2.6. HRVATSKA**

Grad Zagreb je najveći grad u Republici Hrvatskoj, prema podacima Centra za vozila Hrvatske 2017. godine u njemu je bilo registrirano 462.516 vozila kategorije M1, čija je prosječna starost 12 godina. Obzirom na veličinu Grada Zagreba, broj stanovnika i vozila te veličinu područja koje mu gravitira za očekivati je kako se susreće s jednakim problemima smanjene kvalitete zraka kao i ostali veliki europski gradovi.

Mjerenja koja se kontinuirano provode na stanicama za praćenje kvalitete zraka pokazuju kako su koncentracije krutih čestica (PM) i dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>) često višestruko veće od dozvoljenih granica propisanih Direktivom 2008/50/EC. Mjerenja provedena 2014. i 2015. godine pokazuju kako ne samo da su razine emisije štetnih tvari iznad dozvoljenih granica, već pokazuju tendenciju daljnjeg rasta. [19] Nadalje, analizom pojave vršnih koncentracija emisija štetnih tvari iz cestovnih motornih vozila lako je uočljivo da se učestalo pojavljuju periodi tijekom kojih dolazi do prekoračenja graničnih vrijednosti koncentracija štetnih tvari u zraku, a te je periode vrlo lako povezati s vršnim prometnim opterećenjem na prometnicama Grada.

Trenutno Grad Zagreb ne provodi nikakve mjere koji bi dovele do smanjenja onečišćenja zraka odnosno poboljšanja kvalitete zraka. Kako bi se izbjegla kazna Europske Unije zbog ne postizanja cilja o unaprjeđenju kvalitete zraka, potrebno je osmisliti i provesti neku od mjera smanjenja emisija štetnih tvari iz cestovnog prometa. Te mjere mogu biti i prema uzoru na ostale europske gradove koji su ih uspješno implementirali.

## 2. HIPOTEZA

Broj registriranih vozila (automobila) u Republici Hrvatskoj raste iz godine u godinu, a istovremeno raste i njihova prosječna starost [19]. Porastom broja vozila raste ukupna emisija, a porastom prosječne starosti registriranih vozila ujedno se povećava i emisija štetnih tvari iz vozila. Štetne emisije, osim što onečišćuju okoliš, dokazano su opasne i za ljudsko zdravlje. Neka istraživanja pokazala su da dugotrajnije izlaganje štetnim tvarima koje nastaju kao produkti izgaranja u motorima s unutarnjim izgaranjem povećava rizik od oboljenja od astme kod djece [20], rizik od pojave raka i niza drugih bolesti.

Mnoge europske zemlje taj su problem počele rješavati još prije desetak godina ograničavanjem pojedinim vozilima promet određenim dijelovima gradova čime je postignuto poboljšanje kvalitete zraka, ali i zdravlja ljudi [16].

Iz uvodnih razmatranja vidljivo je da se zone uvode samo u većim gradovima s iznimno intenzivnim prometom. U Republici Hrvatskoj, Grad Zagreb je najveći grad i u njemu je koncentrirana četvrtina stanovništva, a kako predstavlja i poslovno središte u njemu se odvija još i veći dio prometa. Naime, provedena istraživanja pokazuju da kvaliteta zraka u Gradu Zagrebu često ne zadovoljava, odnosno prekoračuje propisane granične vrijednosti štetnih tvari koje se nalaze u zraku.

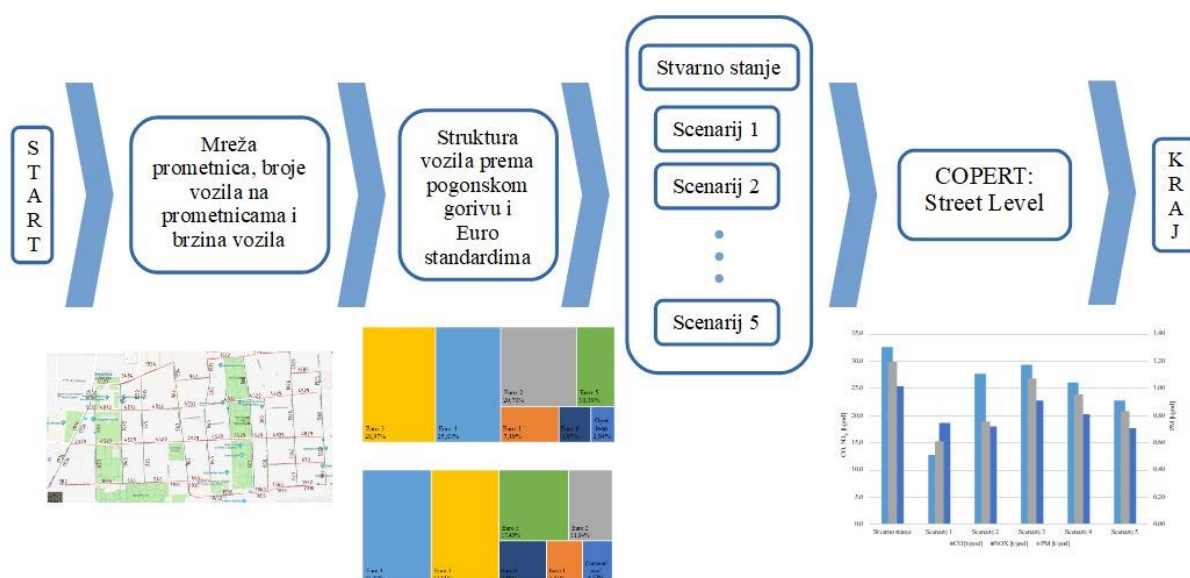
Upravo su prethodno navedene činjenice ono što je potaknulo izradu ovoga rada. Proučavanje koncentracija štetnih tvari u Gradu Zagrebu i istraživanje mogućih načina njihova smanjenja predstavlja prvi korak ka poboljšanju kvalitete zraka. Iz toga i proizlazi hipoteza ovog rada koja glasi: za očekivati je da bi uvođenje tzv. ekološke zone u Gradu Zagrebu smanjilo koncentraciju štetnih tvari u zraku čime bi se poboljšala kvaliteta zraka i samim time poboljšala kvaliteta života ljudi.

Cilj rada je uporabom odgovarajućih matematičkih modela i znanstveno utemeljenih metoda procijeniti utjecaj uvođenja ekološke zone u Gradu Zagrebu na emisiju štetnih tvari iz cestovnih motornih vozila.

### 3. PLAN RADA

Rad je osmišljen na način da se kreira matematički model prometa koji služi za izračun emisija štetnih tvari pomoću programskog paketa *COPERT: Street Level*, tvrtke *Emisia SA*. Programski paket pruža potpuno novi pristup procjeni i izračunu emisija štetnih tvari iz cestovnih motornih vozila. Emisija štetnih tvari izračunava se na osnovu duljine promatrane prometnice, prosječne brzine na toj prometnici, broja vozila i strukture vozila na prometnici.

Dijagram toka za određivanje emisija štetnih tvari iz cestovnih motornih vozila za različite scenarije prikazan je na slici 1.



Slika 1. Dijagram toka određivanja emisija štetnih tvari iz cestovnih motornih vozila za različite scenarije

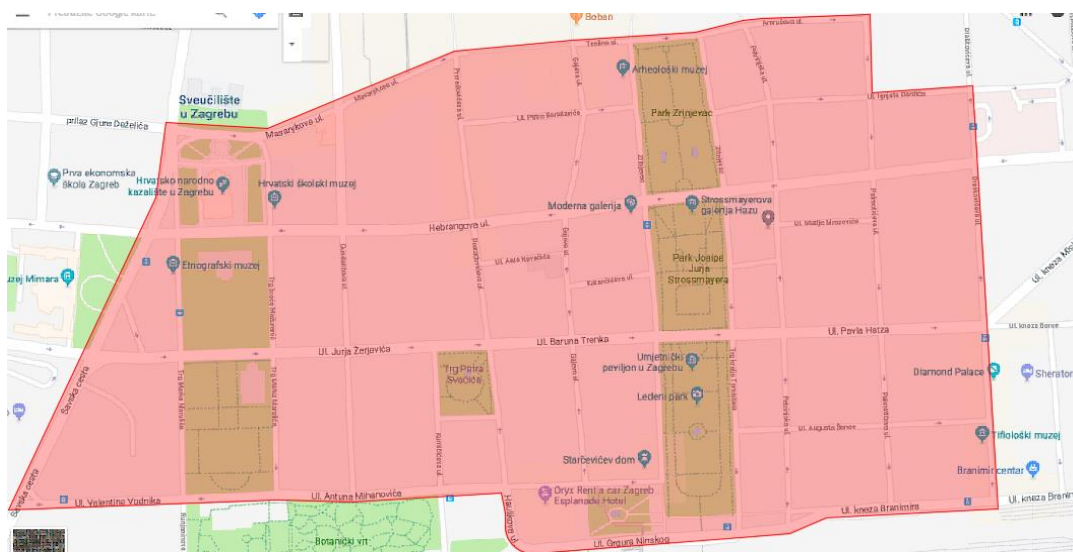
U dijagramu toka vidljivo je da rad obuhvaća faze koje su međusobno povezane u logički slijed koji kroz nekoliko bitno različitih modela dovodi do rezultata koji omogućuju donošenje zaključaka na međusobno usporedivim rezultatima pojedinih faza, odnosno scenarija. Osnovu predstavlja mreža prometnica te broj i brzina vozila na svakoj od razmatranih prometnica. Nadalje, potrebno je poznavati strukturu vozila koja primarno obuhvaća podatke o emisijskom standardu pojedinog vozila, vrstu pogonskog goriva koje se koristi te podatke o starosti vozila. Svi ovi podaci su potrebni za izračun osnovne emisije štetnih tvari, čija će se količina zatim uspoređivati s izračunom emisije štetnih tvari različitih scenarija prometa.



### 3.1. DEFINIRANJE EKOLOŠKE ZONE

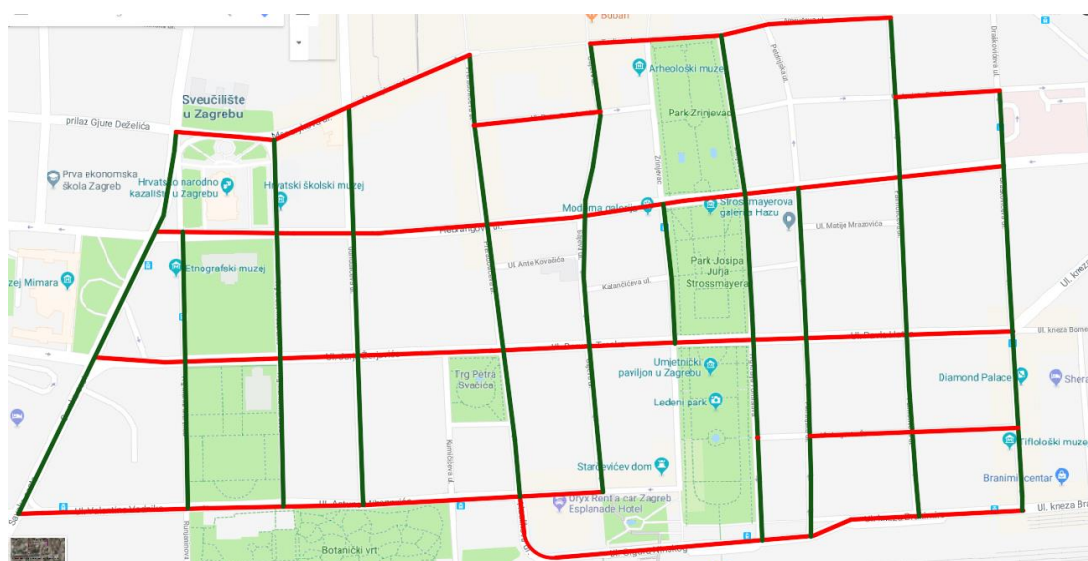
Kao i kod svih europskih gradova smisao zone je s jedne strane odrediti područje u kojem se kreće i boravi znatan dio stanovništva, a s druge strane u kojem postoji intenzivan promet tako da se utjecajem na njega ostvari što je moguće veći učinak.

Za potrebe definiranja ekološke zone odabran je centar grada obuhvaćen Lenucijevom potkovom i dva „zelena vala“, smjer istok-zapad (Boškovićeva ulica i Hebrangova ulica) i smjer zapad-istok (Ulica Jurja Žerjavića, Ulica Baruna Trenka i Ulica Pavla Hatza).



Slika 2. Ekološka zona

Oblik ekološke zone prikazan je na slikama 2 i 3. Ukupna duljina prometnica obuhvaćenih ekološkom zonom iznosi 11,37 km, dok ukupna površina zone iznosi 0,83 km<sup>2</sup>.



Slika 3. Prometnice unutar ekološke zone obuhvaćene proračunom

### 3.2. DEFINIRANJE MAKSIMALNOG KAPACITETA PROMETNICE

Izračun propusne moći prometnica provodi se prema [22]. Propusna moć  $C$  na jednom prometnom traku u jednom satu predočena je jednačbom (1).

$$C = \frac{1000 \cdot V}{a} \quad (1)$$

Gdje je:

- $C$  - propusna moć prometnog traka, voz/h,
- $V$  - brzina vozila, km/h,
- $a$  - sigurnosni razmak između vozila u kretanju, m.

Sigurnosni razmak između vozila u kretanju  $a$ , sastoji se od duljine puta reagiranja  $a_r$  i sigurnosnog razmaka  $a_s$ . Proračun sigurnosnog razmaka između vozila u kretanju provodi se prema [23].

Duljina puta reagiranja  $a_r$  računa se prema jednačbi (2)

$$a_r = \frac{V}{3,6} \cdot t_r \quad (2)$$

Gdje je:

- $a_r$  - sigurnosni razmak u kretanju, m,
- $V$  - brzina vozila, km/h,
- $t_r$  - vrijeme reakcije, iznosi 1,5 s prema [23].

Ograničenje brzine na gradskim prometnicama iznosi 50 km/h i ta vrijednost je uzeta u proračunu propusne moći prometnica i izračunu emisija štetnih tvari iz motornih vozila.

Bitno je naglasiti da ako za jedan smjer vožnje postoji veći broj prometnih trakova, da će i propusna moć biti veća, ali ne proporcionalno broju trakova, nego umanjena za određeni redukcijski koeficijent prema jednačbi (3). [22]

$$C_n = \gamma \cdot n \cdot C \quad (3)$$

Tablica 1. Odnos broja prometnih trakova i koeficijenta redukcije propusne moći

Broj prometnih trakova, n	1	2	3
Koeficijent redukcije propusne moći, $\gamma$	1,00	0,90	0,78

Ovakav način izračuna propusne moći moguć je samo za slučaj da je prometni tok homogen i da su sva vozila jednakih tehničkih karakteristika, svi vozači jednakih psihofizičkih sposobnosti i ako su na svim dijelovima ceste osigurani jednaki uvjeti vožnje, što je za ovakvu vrstu studije prihvatljiva pretpostavka.

### 3.3. ODREĐIVANJE BROJA VOZILA NA PROMETNICAMA

Prometnice koje su uključene u zonu čine svojevrsnu mrežu, a promet na njima može se matematički opisati kao sustav jednažbi. Za potrebe rješavanja sustava jednažbi potrebno je postaviti rubne uvjete. Broje nepoznanica u sustavu jednažbi jednak je broju promatranih prometnica.

Određivanje broja vozila u prometu počinje od sjevero-zapadnog ugla promatrane ekološke zone, odnosno od križanja Savske ceste i Prilaza Gjure Deželića. Promet se predviđa za vršni sat (8:00 do 9:00 na radni dan ili 16:00 do 17:00 na radni dan). Predviđanje prometa temelji se na maksimalnom kapacitetu prometnice, odnosno ukoliko se prometni čvor potpuno nalazi u ekološkoj zoni, na principu očuvanja protoka ili Kirchhoffova zakona. Broj vozila koji ulazi u čvor koji je u potpunosti zatvoren u mrežu mora biti jednak zbroju vozila koja izlaze iz mreže.

$$\sum_{k=1}^n N_{\text{vozila, ulaz}} - \sum_{k=1}^n N_{\text{vozila, izlaz}} = 0 \quad (4)$$



Slika 4. Početna točka za određivanje broja vozila na prometnicama

Na prvom rubnom uvjetu zone, odnosno na promatranoj prometnici sa slike 4 nalazi se broj vozila jednak njezinom maksimalnom kapacitetu opisanom jednažbom (3). Kada vozila sa prometnice dolaze do račvanja s mogućnošću nastavljanja kretanja u smjeru Masarykove ulice

i Trga Republike Hrvatske, dolazi do dijeljenja prometnog toka. Pretpostavlja se da je broj vozila koja nastavljaju ravno u smjeru Masarykove ulice jednak njezinoj propusnoj moći, dok ostatak vozila nastavlja kretanje po Trgu Republike Hrvatske.



Slika 5. Određivanje broja vozila prema maksimalnom kapacitetu prometnice

$$z = y + x \quad (5)$$

Gdje je:

- z - ulazna prometnica maksimalnog kapaciteta,
- y - izlazna prometnica maksimalnog kapaciteta,
- x - izlazna prometnica ostatka.

Primjer zatvorenog čvora koji se potpuno nalazi unutar zone prikazan je na slici 6. Broj vozila koje ulaze u čvor jednak je broju vozila koja izlaze iz čvora.



Slika 6. Primjer zatvorenog čvora

$$w + v = t + u \quad (6)$$

Gdje su:

- w i v - ulazne prometnice u zatvoreni čvor,
- t i u - izlazne prometnice iz zatvorenog čvora,

Primjer otvorenog čvora koji se nalazi na rubu zone prikazan je na slici 7. Broj vozila na prometnicama koja ulaze i izlaze u taj čvor jednak je maksimalnom kapacitetu prometnice.



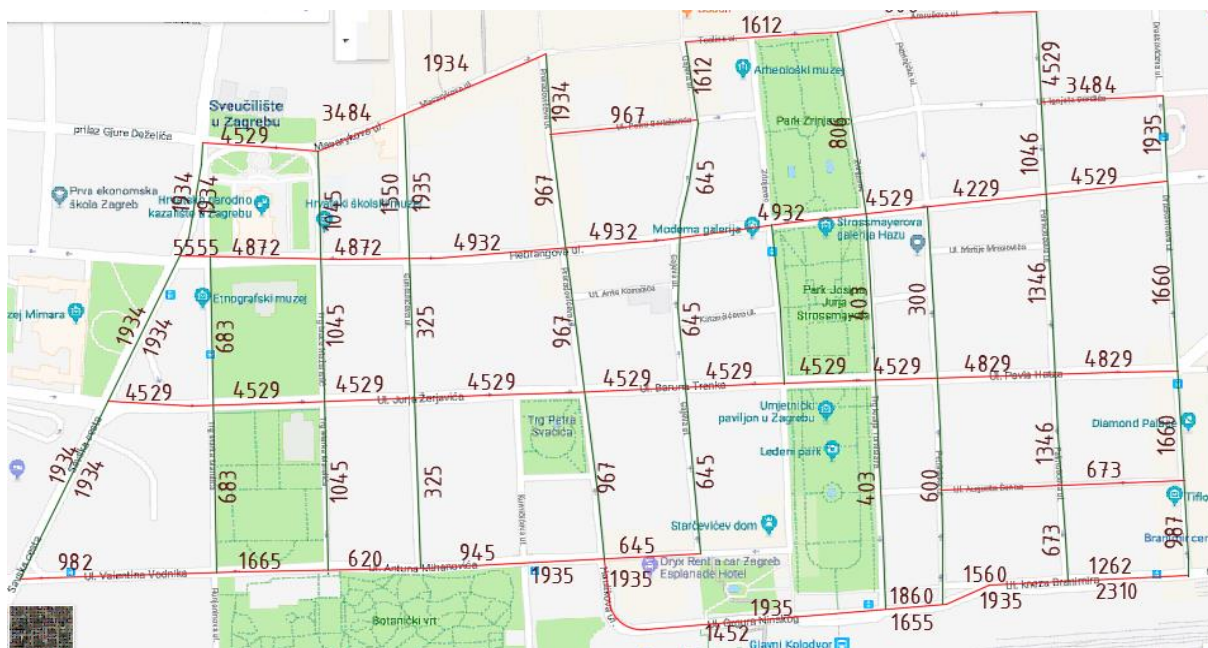
Slika 7. Primjer otvorenog čvora

Na ovaj način definirani su rubni uvjeti potrebni za rješavanje matematičkog modela prometa unutar postavljene zone.

### 3.4. KAPACITETI PROMETNICA

Sustavnom primjenom jednadžbi opisanih u poglavlju 3.2 i 3.3 moguće je opisati matematički model prometa na odabranim prometnicama. Rješavanjem sustava jednadžbi dolazi se do vrijednosti kapaciteta pojedine prometnice u zoni, a rezultati su prikazani na slici 8.

Na slici 8. vidljivo je kako je broj vozila u prometu kroz zonu raznolik i kreće se u rasponu od 645 vozila po satu, za manje prometan segment, pa sve do 5555 vozila, za najprometniji segment zone. Razlog tomu je što neke prometnice imaju više prometnih traka od drugih. Također, neke prometnice imaju duže segmente, odnosno imaju i više drugih prometnica koje se nadovezuju na njih.



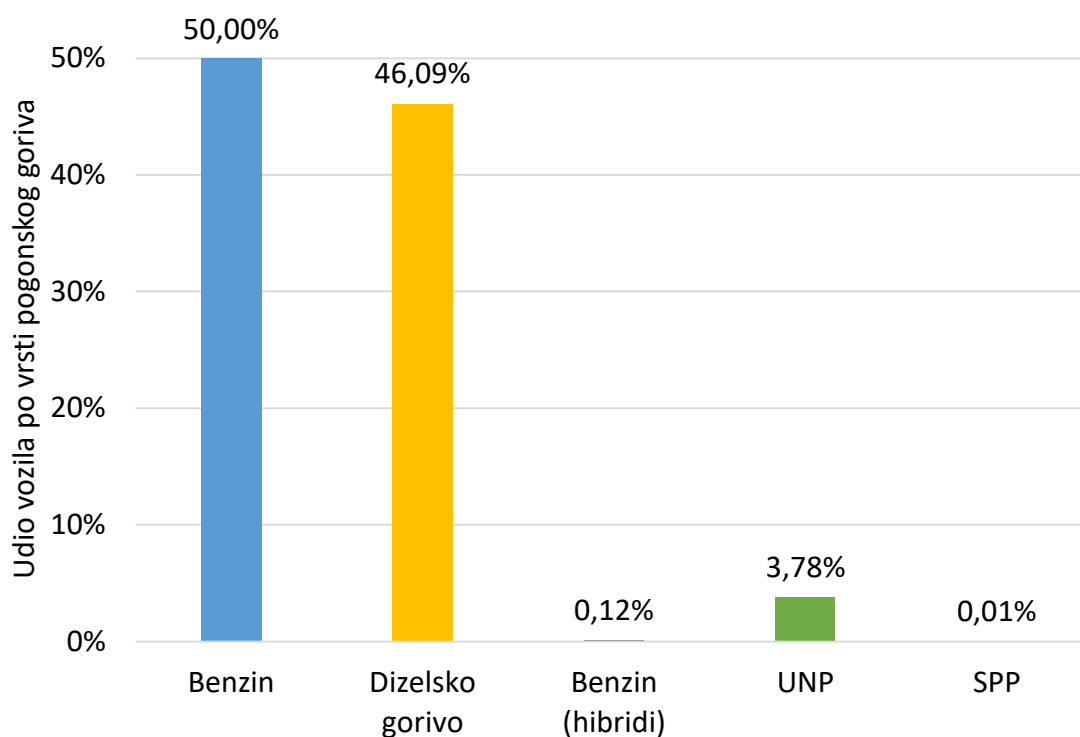
Slika 8. Raspodjela broj vozila na prometnicama unutar ekološke zone

Sa slike 8. je također vidljivo kako se najviše vozila kreće s istoka prema zapadu i obrnuto. Razlog tomu je što je Grad Zagreb u prošlosti građen na način da se promet odvija uzdužno u nekoliko razina. Taj način gradnje, uz kružni oblik, predstavlja jedan od najčešćih oblika gradnje glavnih prometnica u gradovima. Prednost takvih prometnica je kontinuirano pomicanje prometa uz rijetko ometanje uzrokovano okomitim prometnicama.

### 3.5. STRUKTURA VOZILA

Poznavanje strukture vozila koja prometuju po promatranim prometnicama od iznimne je važnosti za proračun emisije štetnih tvari. Budući da se struktura vozila, kao i sam promet, neprestano mijenja u obzir je uzeta prosječna struktura vozila Republike Hrvatske prema podacima Centra za vozila Hrvatske (CVH).

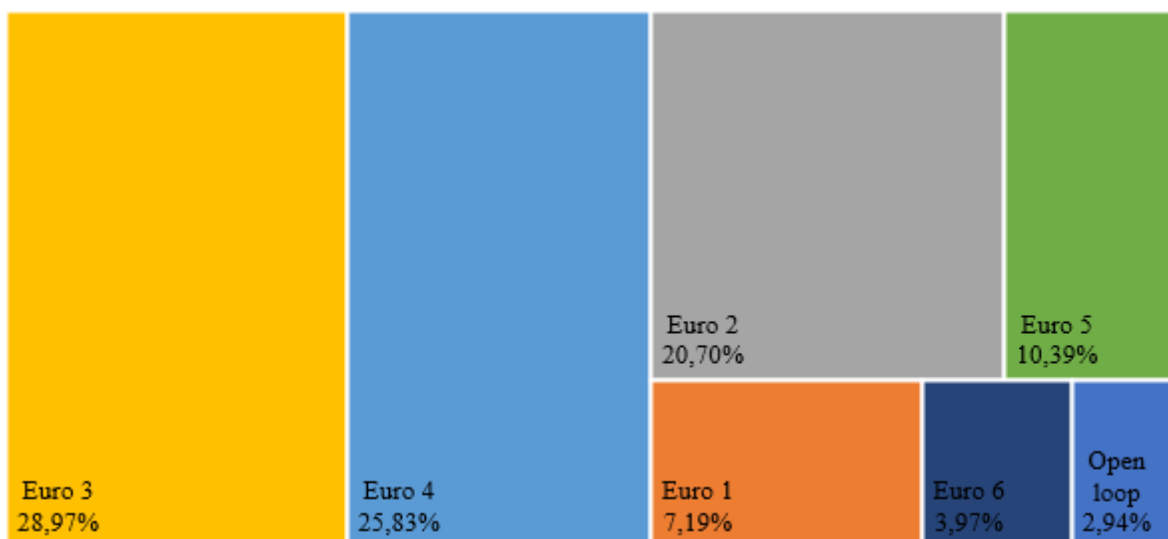
Na slici 9. prikazana je struktura vozila za Republiku Hrvatsku u 2016. godini prema vrsti pogonskog goriva. Najviše je vozila s motorom s vanjskim izvorom paljenja pogonjenih benzinom (50,00 %) i vozila s motorom s kompresijskim paljenjem pogonjenih dizelskim gorivom (46,09 %). Ostale vrste goriva (UNP/LPG i SPP/CNG) zastupljena su sa svega 3,79 % od kojih su to uglavnom UNP/LPG vozila, dok su hibridna vozila s motorom s vanjskim izvorom paljenja zastupljena tek s 0,12 %.



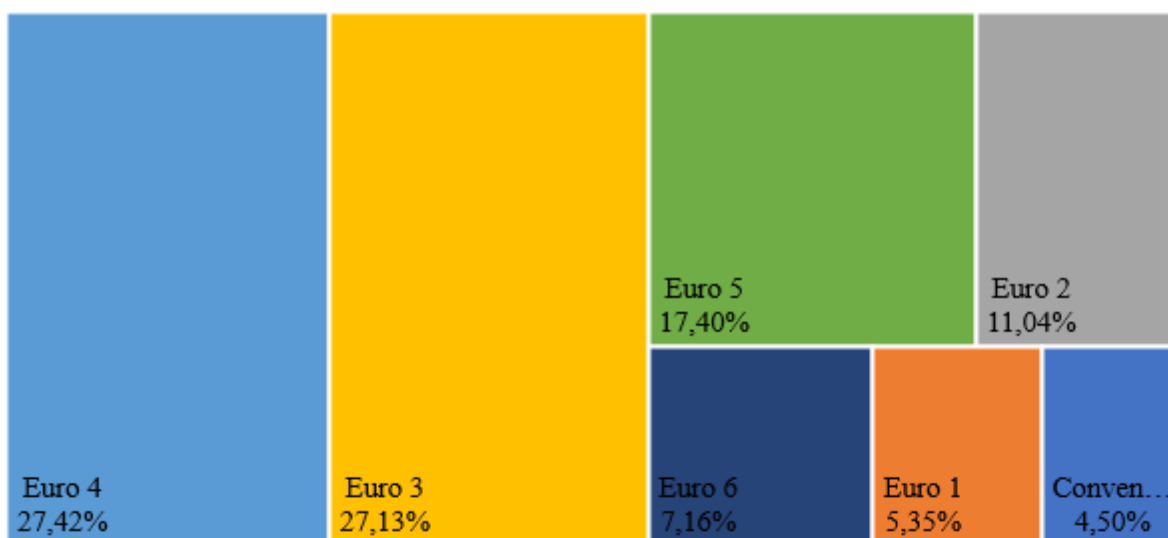
Slika 9. Struktura vozila prema vrsti pogonskog goriva



Na slikama 10 i 11 prikazana je struktura vozila prema emisijskim standardima ovisno o pogonskom gorivu za Republiku Hrvatsku.



Slika 10. Raspodjela vozila pogonjenih benzinom prema emisijskim standardima



Slika 11. Raspodjela vozila pogonjenih dizelskim gorivom prema emisijskim standardima

Kod vozila pogonjenih benzinom prednjače vozila Euro 3 (29,97 %) i Euro 4 (25,83%) emisijskog standarda, proizvedena od siječnja 2000. godine do rujna 2009. godine. Kod vozila pogonjenih dizelskim gorivom također prednjače vozila Euro 3 (27,13%) i Euro 4 (27,42%) standarda koja su proizvedena od siječnja 2000. godine do rujna 2009. godine

Navedeni udjeli odnose se samo na vozila kategorije M1, jer su upravo takva vozila najčešća u gradskom prometu. Na jednak način je moguće strukturirati vozila i za ostale kategorije.



### 3.6. DEFINIRANJE SCENARIJA

Učinak ekološke zone na emisiju štetnih tvari iz cestovnog prometa pratit će se kroz više različitih scenarija. Rezultati proračuna osnovnog modela usporedit će se sa svakim od scenarija kako bi se prepoznao najučinkovitiji model povećanja kvalitete zraka unutar ekološke zone.

#### SCENARIJ 0

Nulti scenarij predstavlja postojeće stanje u strukturi vozila unutar promatrane ekološke zone prema podacima iz 2016. godine. Nulti scenarij je referentni scenarij, tj. rezultati proračuna svih stalih scenarija uspoređuju se s rezultatima proračuna nultog scenarija kako bi se prepoznao najučinkovitiji način povećanja kvalitete zraka unutar ekološke zone.

#### SCENARIJ 1

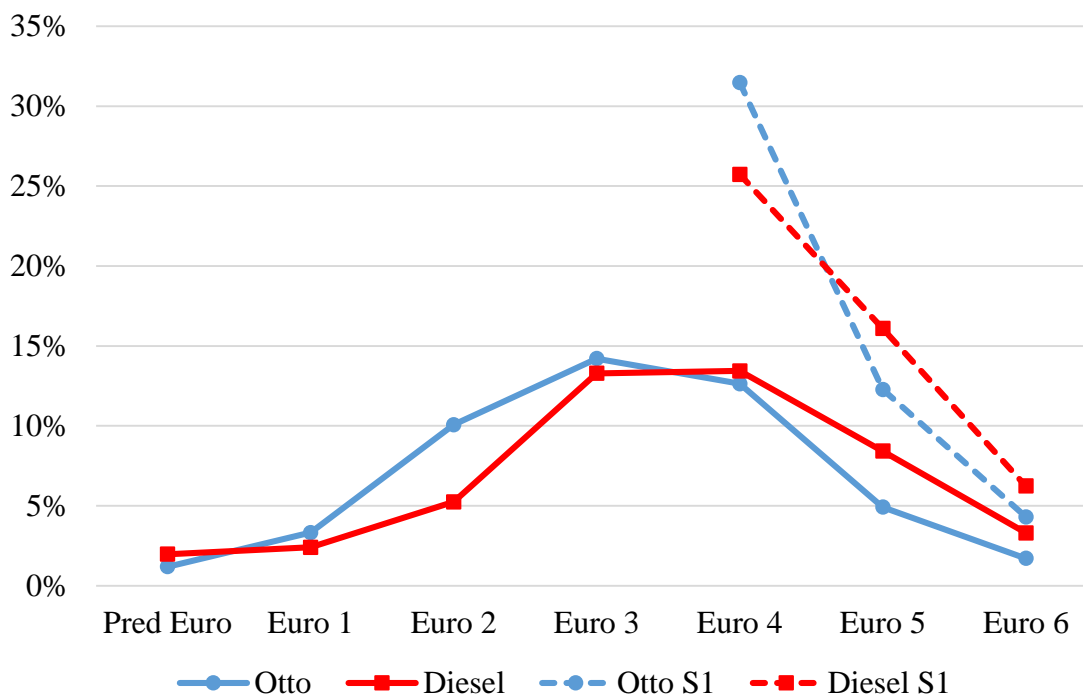
Prvi scenarij će u obzir uzimati isključenje iz prometa ekološkom zonom svih vozila emisijskog standarda Euro 3 i niže, odnosno vozila stavljenih na tržište prije siječnja 2005. godine pogonjenih benzinom i dizelskim gorivom. Za povećanje udjela vozila Euro 4 standarda i više koristi se funkcija „Auto adjust“ sadržana u programu *COPERT: Street Level*.

Select category	Technology	Value	
- Passenger Cars Gasoline Leaded Gasoline Unleaded Diesel LPG Hybrid Gasoline CNG Bioethanol	Open Loop	0.00 %	Discard changes Current category All categories Auto adjust
	PC Euro 1 - 91/441/EEC	0.00 %	
	PC Euro 2 - 94/12/EEC	0.00 %	
	PC Euro 3 - 98/69/EC Stage2000	0.00 %	
	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005	64.25 %	
	PC Euro 5 - EC 715/2007	25.85 %	
	PC Euro 6 - EC 715/2007	9.90 %	
- Light Commerci... Gasoline Leaded Gasoline Unleaded Diesel	PC Euro 6+	0.00 %	
		100.00 %	

Slika 12. Nova struktura vozila pogonjenih benzinom

Select category	Technology	Value	
- Passenger Cars Gasoline Leaded Gasoline Unleaded Diesel LPG Hybrid Gasoline CNG Bioethanol	Conventional	0.00 %	Discard changes Current category All categories Auto adjust
	PC Euro 1 - 91/441/EEC	0.00 %	
	PC Euro 2 - 94/12/EEC	0.00 %	
	PC Euro 3 - 98/69/EC Stage2000	0.00 %	
	PC Euro 4 - 98/69/EC Stage2005	52.75 %	
	PC Euro 5 - EC 715/2007	33.47 %	
	PC Euro 6 - EC 715/2007	13.77 %	
- Light Commerci... Gasoline Leaded Gasoline Unleaded Diesel	PC Euro 6+	0.00 %	
		100.00 %	

Slika 13. Nova struktura vozila pogonjenih dizelskim gorivom

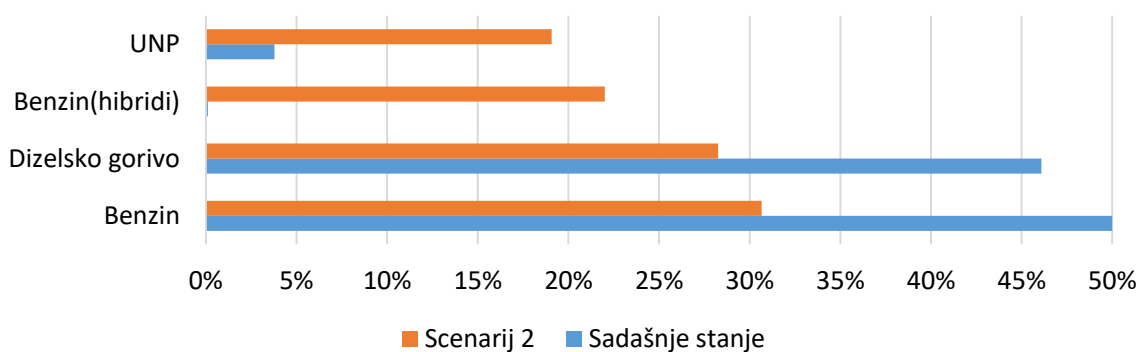


Slika 14. Trenutačna struktura vozila (puna linija) i nova struktura vozila (crtkana linija)

Na slici 15. prikazan je način promjene strukture vozila unutar programa *COPERT: Street Level*. Slika 15. prikazuje odnos stare strukture vozila i predviđene nove strukture. Broj vozila koja se kreću kroz ekološku zonu neće se mijenjati jer se očekuje da će se s vremenom povećati broj novih vozila sve dok se promet ne stabilizira na novoj strukturi vozila.

## SCENARIJ 2

Drugi scenarij je zamišljen na način da se mijenja struktura vozila promjenom zastupljenosti pojedine vrste pogona, odnosno vrste goriva koje vozilo koristi. Na slici 15. je prikazana nova struktura vozila sa drugačijim pogonskim udjelima.



Slika 15. Promjena strukture vozila prema pogonu

Promjenom udjela pogona automatski se mijenja i struktura vozila obzirom na starost. Kao i u scenariju 1, broj vozila koja se kreću kroz ekološku zonu neće se mijenjati jer se očekuje da će se s vremenom povećati broj novih vozila sve dok se promet ne stabilizira na novoj strukturi vozila.

U ranije opisanim scenarijima broj vozila ostaje konstantan dok se scenariji 3, 4 i 5 zasnivaju isključivo na smanjenju broja vozila u prometu.

### **SCENARIJ 3**

Scenarij 3 uvodi smanjenje od 10 % od osnovnog broja vozila izračunatog na osnovu 3.2 i 3.3.

### **SCENARIJ 4**

Scenarij 4 uvodi smanjenje od 20 % od osnovnog broja vozila izračunatog na osnovu 3.2 i 3.3.

### **SCENARIJ 5**

Scenarij 5 uvodi smanjenje od 30 % od osnovnog broja vozila izračunatog na osnovu 3.2 i 3.3.

Pregled svih scenarija za koje se provodi izračun emisija štetnih tvari prikaz je u tablici 2.

*Tablica 2. Pregled svih scenarija*

<b>Scenarij</b>	<b>Opis</b>
<b>0</b>	Postojeće stanje
<b>1</b>	Isključenje iz prometa svih vozila emisijskog standarda Euro 3 i niže
<b>2</b>	Promjena zastupljenosti pojedine vrste pogona, odnosno vrste goriva
<b>3</b>	Smanjenje broj vozila u iznosu od 10% od osnovnog broja vozila
<b>4</b>	Smanjenje broj vozila u iznosu od 20% od osnovnog broja vozila
<b>5</b>	Smanjenje broj vozila u iznosu od 30% od osnovnog broja vozila

### 3.7. IZRAČUN EMISIJE ŠTETNIH TVARI PROGRAMOM *COPERT: STREET LEVEL*

Za izračun ukupne emisije potrebno je definirati emisijske faktore. Emisijski faktori moraju biti iz pouzdanih izvora kao npr. proizvođača motora s unutarnjim izgaranjem ili agencija za zaštitu okoliša koji provode istraživanja o emisiji iz izvora izgaranja, u ovome slučaju iz motora vozila. Emisijski faktor je broj koji povezuje aktivnost promatranog objekta s emisijom štetnih tvari. Primjeri emisijskih faktora za brzinu vozila od 50 km/h prikazani su u tablici 3. Oznaka B predstavlja vozila pogonjena benzinom, dok oznaka D označava vozila pogonjena dizelskim gorivom.

Tablica 3. Prikaz emisijskih faktora za brzinu od 50 km/h u ovisnosti o vrsti goriva i starosti vozila

	CO [g/km]		CO <sub>2</sub> [g/km]		NO <sub>x</sub> [g/km]		PM [g/km]	
	B	D	B	D	B	D	B	D
<b>Euro 0</b>	4,55	0,57	155,73	156,25	1,37	0,62	0,00	0,17
<b>Euro 1</b>	1,53	0,33	174,05	167,02	0,26	0,56	0,00	0,05
<b>Euro 2</b>	0,60	0,25	134,00	170,23	0,14	0,59	0,00	0,04
<b>Euro 3</b>	0,56	0,08	142,92	192,54	0,07	0,68	0,00	0,03
<b>Euro 4</b>	0,22	0,06	147,81	192,94	0,05	0,47	0,00	0,03
<b>Euro 5</b>	0,27	0,04	154,46	185,99	0,02	0,54	0,00	0,00
<b>Euro 6</b>	0,23	0,05	162,19	153,27	0,03	0,18	0,00	0,00

Aktivnost vozila predstavlja prijeđeni put vozila i njegovu brzinu na promatranom putu. Osnovna jednadžba izračuna emisije pojedine štetne tvari je:

$$\text{Ukupna emisija} = \text{Aktivnost vozila} \times \text{Emisijski faktor} \quad (7)$$

Primjenom ove metode moguće je izračunati ukupnu emisiju štetnih tvari iz prometa u određenom periodu na promatranom području. U ovom radu razmatrana je emisija u području predložene ekološke zone tijekom vršnog sata.

Za izračun prema navedenoj metodi potrebno je odrediti ukupan broj vozila, razdijeliti ih prema strukturi, svakome vozilu pridružiti prijeđeni put, brzinu, odgovarajući emisijski faktor i na kraju odrediti emisiju. Za izračun ukupne emisije koristi se sljedeća jednačba:

$$E_p = \sum_{GORIVO} \sum_{\substack{EURO \\ STAND.}} \sum_{j=1}^n EF_p \left[ \frac{g}{km} \right] \times s_j [km] \quad (8)$$

Gdje je

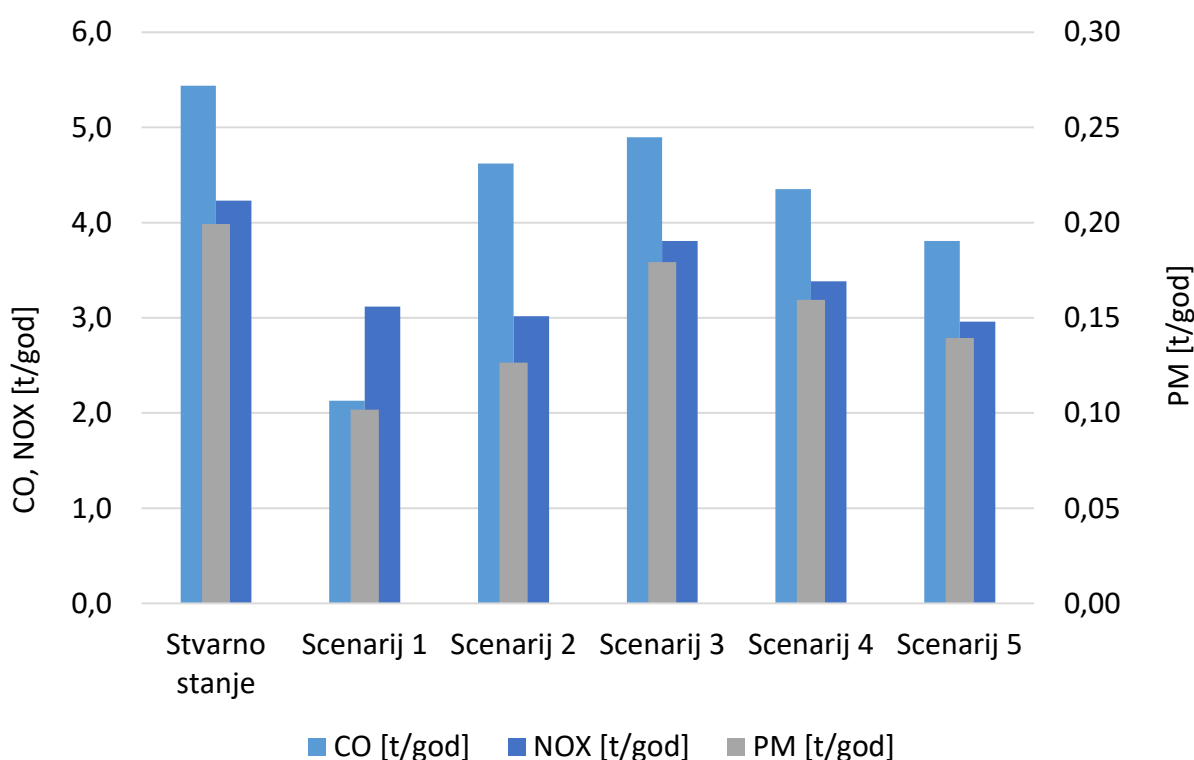
- p - vrsta štetne tvari,
- n - broj promatranih vozila,
- $EF_p$  - emisijski faktor štetne tvari ovisno o vozilu,
- $s_j$  - prijeđeni put promatranog vozila
- $E_p$  - ukupna emisija promatrane štetne tvari, g.

Kako bi se osigurao siguran i točan izračun ukupne emisije štetnih tvari korišten je simulacijski alat *COPERT: Street Level*, programski paket usko specijaliziran za izračun emisija na razini prometnica. Program radi na prethodno opisanom principu i olakšava korisniku razvrstavanje vozila ovisno o njihovoj strukturi, odnosno pogonskom gorivu i starosti.

## 4. REZULTATI

### 4.1. EMISIJA ŠTETNIH TVARI IZ PROMETA

Glavni cilj rada je prikazati i usporediti više mogućih scenarija prometa s ciljem smanjenja emisija štetnih tvari iz cestovnog prometa. Na slici 16. prikazani su rezultati izračuna ukupne emisije štetnih tvari unutar predložene ekološke zone. Rezultati se odnose na ukupnu duljinu svih prometnica unutar zone tijekom vršnih satova prometa. Nadalje, kako bi rezultati bili jasniji, odnosno kako bi ih se moglo jednostavnije usporediti sa rezultatima u znanstvenoj literaturi, oni su preračunati na godišnju razinu pretpostavljajući kako se vršni sat prometa pojavljuje dva puta dnevno svakog radnog dana. Treba napomenuti da bi ukupne emisije na godišnjoj razini bile znatno veće jer se promet odvija trajno, ali s različitim intenzitetom o čemu nažalost nema dovoljno kvalitetnih rezultata. S druge strane, za usporedbu učinkovitosti pojedinog scenarija irelevantno je koji se vremenski period uspoređuje.



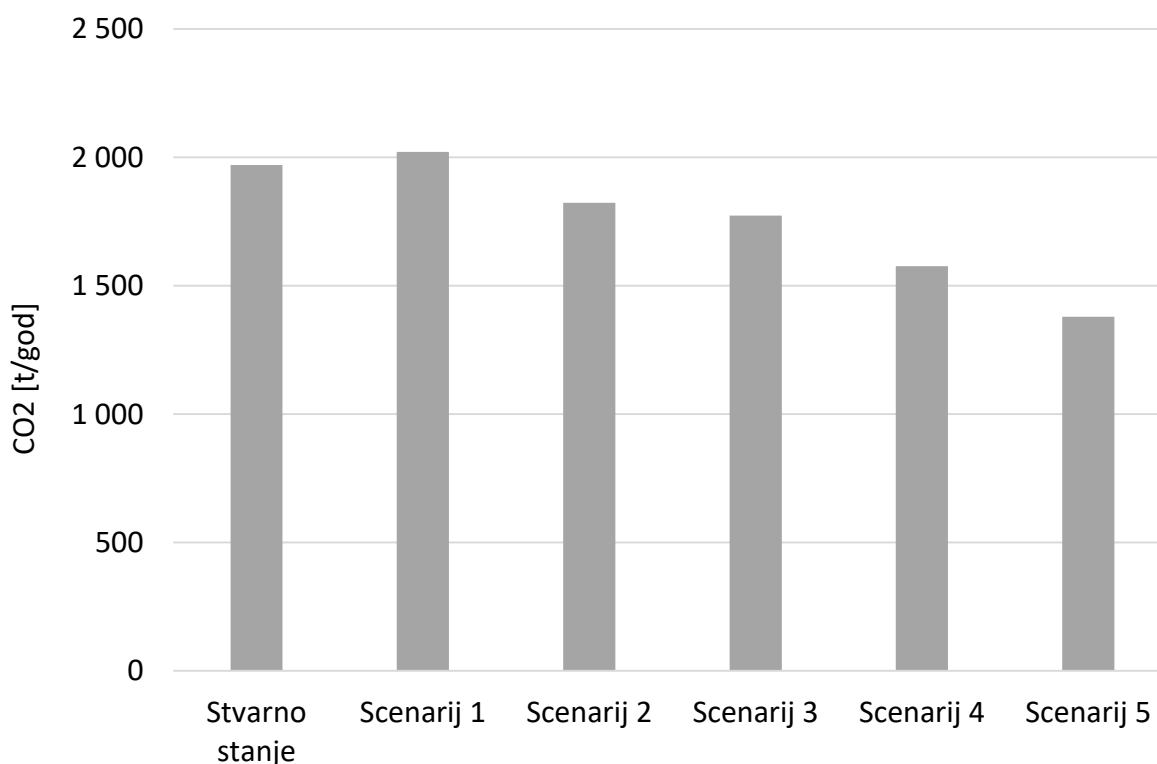
Slika 16. Rezultati izračuna ukupne emisije štetnih tvari i ugljikovog dioksida

Iz slike 16. vidljiv je utjecaj pojedinog scenarija na razinu emisije štetnih tvari. Vidljivo je kako scenarij 1 pruža smanjenje emisije NO<sub>x</sub>-a za 1,11 t/god, što je jednako smanjenju prometa u iznosu od 26,27 % za trenutačnu strukturu vozila, dok scenarij 2 pruža nešto učinkovitije smanjenje od 1,21 t/god, odnosno ekvivalent smanjenju prometa za 28,71 %.

Nasuprot tomu, scenarij 2 pridonosi smanjenju CO u iznosu od 0,82 t/god, što je moguće protumačiti kao smanjenje prometa u iznosu od 15,05 %, dok se scenarij 1 pokazao znatno učinkovitijim sa smanjenjem od 3,3 t/god, odnosno ekvivalentom smanjenja prometa od 60,84 % za trenutačnu strukturu vozila.

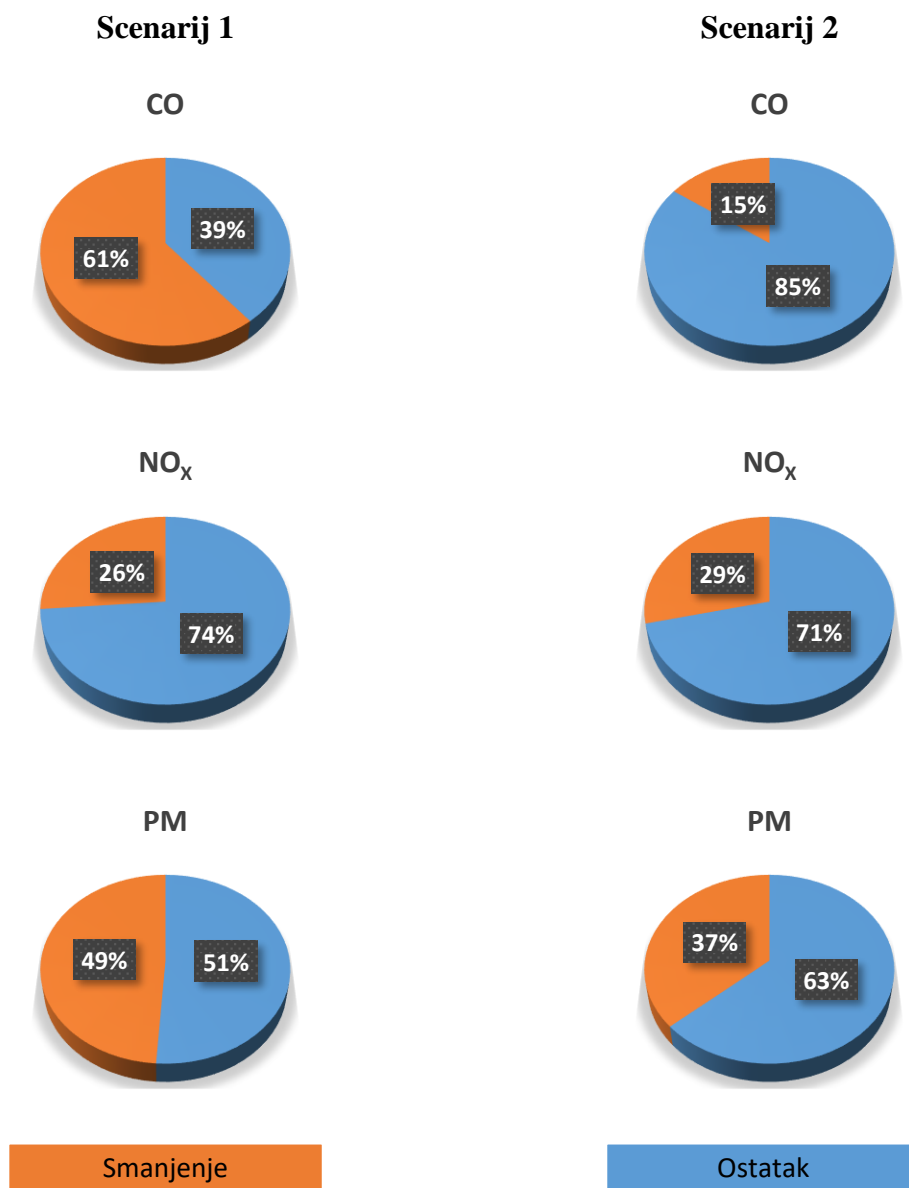
Značajno smanjenje emisije krutih čestica ostvaruje se zamjenom starih vozila novima kako je osmišljeno u scenariju 1. Vidljivo je kako se ukupna emisija krutih čestica na taj način spustila na razinu kao da na tim prometnicama prođe upola manje vozila u jednakom vremenu, odnosno ostvareno je smanjenje od gotovo 100 kilograma godišnje. Scenarij 2 također ostvaruje smanjenje emisije krutih čestica, ali u nešto manjem iznosu, tako je sa njim moguće postići smanjenje od 73 kilograma godišnje.

Nelogičnost rezultata, na prvi pogled, predstavlja povećanje emisije CO<sub>2</sub> kod scenarija 1 kako je i vidljivo na slici 17. Razlog tomu je što su u tom scenariju stara vozila su zamijenjena novim, u pravilu, težim vozilima. Kako masa vozila ima izravan utjecaj na potrošnju goriva, odnosno emisiju CO<sub>2</sub> tako je ukupna emisija tih vozila veća nego li je u slučaju starih vozila.



Slika 17. Rezultati izračuna ukupne emisije ugljikova dioksida za pojedine scenarije

Na slici 18 prikazana je usporedba utjecaja dvaju scenarija na smanjenje emisije štetnih tvari u odnosu na sadašnje stanje.



Slika 18. Usporedba smanjenja emisije štetnih tvari prvim i drugim scenarijem

Prema slici 18. lagano je uočiti prednosti pojedinog scenarija na emisiju štetnih tvari. Dok prvi scenarij pruža prednosti kod emisije CO i PM, drugi scenarij ostvaruje bolji utjecaj na NO<sub>x</sub>.

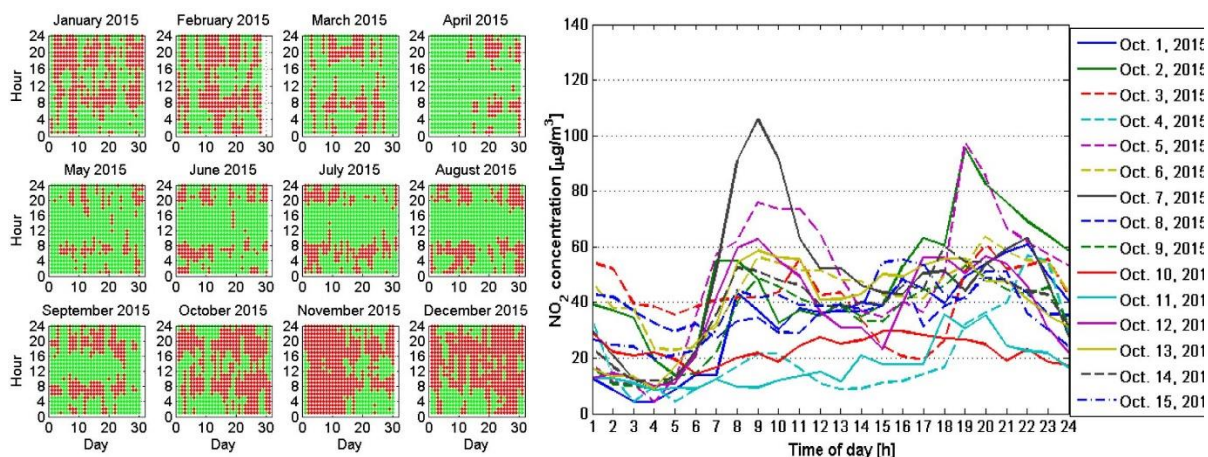


## 5. RASPRAVA

Prethodno je navedeno da su štetne tvari koje nastaju izgaranjem u motorima s unutarnjim izgaranjem štetne za ljudsko zdravlje, pri čemu treba izdvojiti sitne čestice koje su posebno opasne za dišni sustav.

Rezultati izračuna jasno pokazuju da će se uvođenjem ekološke zone smanjiti koncentracija štetnih tvari, što znači da će se smanjiti opasnost za zdravlje ljudi i poboljšati kvaliteta zraka. To za sobom povlači i lokalno pomlađivanje voznog parka što izravno utječe i na sigurnost prometa, ali i moguće smanjenje prometa. Budući da će nekim vozilima biti zabranjen promet ekološkom zonom, postoji vjerojatnost da će ljudi više putovati javnim prijevozom, biciklima ili pješice. Dakle, uvođenje ekološke zone će pozitivno utjecati i na zdravlje ljudi, ne samo u smislu poboljšanja kvalitete zraka, već i u smislu fizičke aktivnosti. Unatoč brojnim prednostima koje uvođenje ekološke zone ima, ono ima i svojih nedostataka. Uzimanjem u obzir omjer površine ekološke zone (0,83 km<sup>2</sup>) i cijelog Grada Zagreba (641 km<sup>2</sup>) uočava se kako je udio zone skoro pa zanemariv i predstavlja tek 0,13 % ukupne površine grada. Stoga je pogrešno očekivati da će se uvođenjem ekološke zone odmah smanjiti koncentracija štetnih tvari u cijelom Gradu. Neće, smanjit će se samo u onom području koje je obuhvaćeno ekološkom zonom, a prikazani rezultati vrijedit će samo ako se izuzme utjecaj štetnih tvari izvan zone na koncentraciju štetnih tvari u zoni (štetne tvari se šire vjetrom i slično). Uvođenje ekološke zone zahtjevno je i s ekonomske strane.

Pitanje je zašto je izračun emisije proveden samo za vršne satove? Razlog tomu je nemogućnost unificiranja svakodnevnog prometa jer na njega utječu mnogobrojni faktori te se on razlikuje od dana do dana. Za detaljniju provedbu izračuna emisije štetnih tvari iz prometa potrebno je provesti brojanje prometa te na osnovu njega izraditi model cjelodnevnog prometa. Vršni satovi prometa ostvaruju se gotovo svakodnevno i ovise jedino o vrsti prometnice na kojoj se odvijaju pa ih je jednostavnije ujednačiti i nad njima provesti izračun emisije. Nadalje, istraživanja su pokazala kako je upravo emisija štetnih tvari vršnog sata prometa najzaslužnija za prekoračenje dnevnih limita emisije štetnih tvari. Smanjenje emisije vršnih satova dovelo bi Grad Zagreb u dozvoljenu granicu i time bi se ostvarili ciljevi postavljeni od strane Europske Unije.



Slika 19. Prekoračenja dopuštenih granica emisije  $NO_x$  ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) [19]

Direktiva 2009/33/EC o promicanju čistih i energetski učinkovitih vozila u cestovnom prijevozu [24] predlaže cjenik za izračun troškova štetnih emisija. Odmah treba napomenuti da ti troškovi nisu stvarni već predstavljaju ekvivalentne vrijednosti učinka na okoliš. Prema Direktivi 2009/33/EC troškovi emisije iznose 0,03-0,04 EUR/kg za  $CO_2$ , 0,0044 EUR/g za  $NO_x$ , odnosno 0,087 EUR/g za PM. Bilo bi pogrešno prikazivati uštedu ostvarenu izračunom emisija ovim radom, jer se izračun emisije odnosi samo na dva sata u danu. No kako već takav izračun emisije ostvaruje svoje rezultate u tonama štetnih tvari godišnje, moguće je zaključiti kako je već i za ta dva sata dnevno moguće ostvariti značajnu uštedu na godišnjoj razini.

Postavljaju se pitanja koliki će biti troškovi uvođenja ekološke zone, kako će se kontrolirati vozila koja ulaze u tu ekološku zonu i mnoga druga slična pitanja. Posebno je važno razmisliti o tome kako ostvariti, ranije spomenute, scenarije.

Scenarij 1 predviđa zabranu prometa vozilima emisijskog standarda Euro 3 i niže. Vlasnicima takvih vozila trebala bi se olakšati zamjena njihovih vozila po principu „staro za novo“ ili ih, nekim drugim vrstama poticaja, potaknuti na kupnju vozila prihvatljivijeg emisijskog standarda.

S druge strane, scenarij 2 predviđa promjenu strukture vozila promjenom zastupljenosti pojedine vrste pogona, odnosno goriva. Cilj je smanjiti udio vozila s konvencionalnim pogonom, a povećati udio hibridnih vozila i vozila pogonjenih UNP-om/LPG-om. Kao i u prethodnom slučaju, i za tu mjeru ovdje trebalo bi planirati poticaje za one koji žele ugraditi plinski uređaj u svoja vozila ili žele kupiti nova vozila pogonjena UNP-om/LPG-om.

Nadalje, scenarij 3 temelji se isključivo na smanjenju broja vozila u prometu u određenom postotku. Budući da određeni postotak ljudi više neće moći putovati svojim vozilima ekološkom zonom, pretpostavlja se da će više koristiti javni prijevoz. Zbog toga bi se njima trebalo omogućiti sufinanciranje karti za javni gradski prijevoz. Takva mjera ne bi bila teško izvediva, jer je tijekom određenih vremenskih razdoblja promet u užem središtu grada već bio besplatan za sve korisnike, što je pokazalo pozitivne učinke.

Ranije je spomenuto kako je za prvi i drugi scenarij zadržan broj vozila izračunat prema maksimalnom kapacitetu prometnica. Razlog tomu je što unatoč smanjenju ukupnog broja vozila koja prometuju Gradom Zagrebom, očekuje se porast broja novih vozila kroz nekoliko godina. Slična situacija dogodila se i ostalim europskim gradovima koji su uveli ekološku zonu sa zabranom prometovanja starih vozila. U prvim godinama zabilježeno je smanjenje broja vozila u prometu sve dok se kroz nekoliko godina ukupni broj vozila vratio na početnu vrijednost i nastavio svoj rast. Dakle za očekivat je kako bi u početku smanjenje emisije bilo višestruko veće zbog promjene strukture vozila i samog broja vozila, no potrebno je osigurati dugotrajno rješenje koje bi zadovoljavalo tražene vrijednosti i nakon stabilizacije broja vozila.

U pojedinim europskim zemljama ekološke zone počele su se uvoditi još početkom 21. stoljeća u gradovima u kojima je koncentracija štetnih tvari bila daleko iznad dopuštene. Radi se o gradovima s velikom gustoćom prometa i velikim brojem stanovnika. Istraživanja koja su provedena u Njemačkoj nakon uvođenja ekoloških zona pokazala su da se koncentracija štetnih tvari smanjila između 5 i 15 %. Nadalje, daljnje uvođenje ekoloških zona u Njemačkoj nema dodatnog potencijala za smanjenje onečišćenja zraka. Postotak vozila koja smiju prometovati ekološkim zonama iznosi 89 %, stoga bi uvođenje novih ekoloških zona imalo veći utjecaj samo ako bi postavljene nove granične vrijednosti bile strože [25]. Za razliku od Njemačke struktura vozila u Republici Hrvatskoj je bitno drugačija te bi scenarij 1 isključivao iz prometa više od 50,0 % vozila što bi rezultiralo daleko većim učincima nego li u Njemačkoj.

## 6. ZAKLJUČAK

Uvođenje ekoloških zona u velike gradove započelo je prije više od 15 godina, a smatra ih se brzim i učinkovitim načinom smanjenja onečišćenja zraka i poboljšanja kvalitete života u gradskim središtima. Uvođenje ekoloških zona u to doba predstavljalo je značajan rizik zbog teško predvidljive budućnosti razvoja vozila. Mnogi gradovi koji su začeli ideju ekoloških zona danas se ponovno susreću s istim problemom, a glavni razlog toga leži u nemogućnosti predviđanja dugoročnih rezultata uvođenja ekološke zone zbog konstantnog pooštavanja graničnih vrijednosti kvalitete zraka s jedne strane i stalnog napretka u tehnologiji vozila s druge strane. Može se reći kako je tehnologija vozila vezana za ispušne plinove iz vozila pri svom vrhuncu te upravo to predstavlja priliku koju treba iskoristiti.

Danas, za razliku od prošlosti, postoje alati čija je osnovna funkcija predviđanje emisija štetnih tvari iz motornih vozila u prometu, a jedan od tih alata je *COPERT: Street Level* koji je i korišten u ovom radu. Kroz tri različita scenarija proučeni su utjecaji strukture i broja vozila na smanjenje razine emisije štetnih tvari u Gradu Zagrebu.

Rezultatima su pokazane izračunate promijenjene emisije štetnih tvari (NO<sub>x</sub>, CO i PM), a u svim scenarijima došlo je do smanjenja emisija štetnih tvari. U scenariju koji iz prometa isključuje stara vozila ostvareno je smanjenje NO<sub>x</sub>-a za 26 %, CO-a za 61 % i PM-a za 49 %. U scenariju koji promatra strukturu vozila ovisno o pogonu utvrđeno je smanjenje NO<sub>x</sub>-a za 29 %, CO-a za 15 % i PM-a za 37 %. Prvi scenarij pokazao se boljim u pogledu smanjenja emisija CO i PM, dok je drugi pogodniji u pogledu smanjenja NO<sub>x</sub>. Nadalje, scenarijem 3 promatran je i utjecaj smanjenja broja vozila. Postupnim smanjivanjem broja vozila ostvaruje se i smanjenje emisije štetnih tvari, ali to smanjenje je manje nego kod prethodno spomenutih scenarija 1 i 2.

Na temelju svega prethodno navedenog, zaključuje se da bi uvođenje ekološke zone značajno smanjilo koncentraciju štetnih tvari u zraku koje su posljedica emisija cestovnih motornih vozila. Osim što bi se smanjila opasnost za zdravlje ljudi i poboljšala kvaliteta zraka, povećala bi se i svijest ljudi o važnosti zaštite okoliša.

## LITERATURA

- [1] EEA. European Union emission inventory report 1990–2015 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). No 9/2017 <https://www.eea.europa.eu/publications/annual-eu-emissions-inventory-report>
- [2] Costa LG, Cole TB, Coburn J, Chang Y, Dao K, Roqué PJ. Neurotoxicity of traffic-related air pollution. *NeuroToxicology*. 2017 Mar;59:133-139. doi. 10.1016/j.neuro.2015.11.008
- [3] Hendricks J, Righi M, Dahlmann K, Gottschaldt K, Grewe V, Ponater M, Sausen R, Heinrichs D, Winkler C, Wolfermann A, Kampffmeyer T, Friedrich R, Klötzke M, Kugler U. Quantifying the climate impact of emissions from land-based transport in Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2017 July. doi. 10.1016/j.trd.2017.06.003
- [4] DIREKTIVA 2008/50/EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA o kvaliteti zraka i čistom zraku za Europu. SLUŽBENI LIST EUROPSKE UNIJE. 2008 May;15(29):169-212. [http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014\\_2019/plmrep/COMMITTEES/ENVI/DV/2016/06-15/CELEX\\_32008L0050\\_HR.pdf](http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014_2019/plmrep/COMMITTEES/ENVI/DV/2016/06-15/CELEX_32008L0050_HR.pdf)
- [5] Božić M, Vučetić A, Sjerić M, Kozarac D, Lulić Z. Experimental Study on Knock Sources in Spark Ignition Engine with Exhaust Gas Recirculation. *Energy conversion and management*. 2018 June;165:35-44. doi. 10.1016/j.enconman.2018.03.053
- [6] Babić V. Izvori i svojstva NO<sub>x</sub> spojeva. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije; 2015.
- [7] Kurt OK, Zhang J, Pinkerton KE. Pulmonary health effects of air pollution. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, 138–143 doi. 10.1097/MCP.0000000000000248
- [8] Poorfakhraei A, Tayarani M, Rowangould G. Evaluating health outcomes from vehicle emissions exposure in the long range regional transportation planning process. *Journal of Transport & Health*. 2017 Sept;6:501-505. doi. 10.1016/j.jth.2017.05.177
- [9] Poplašen D. Aromatski ugljikovodici – izloženost i utjecaj na zdravlje. *Sigurnost*. 2015;57(1):65-67
- [10] Ministarstvo zaštite okoliša i prirode. Više o učinku staklenika <http://klima.mzoip.hr/default.aspx?id=43>
- [11] Holman C, Harrison R, Querol X. Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities. *Atmospheric Environment*. 2015 June;111:161-169. doi. 10.1016/j.atmosenv.2015.04.009
- [12] Urban Access Regulations In Europe <http://urbanaccessregulations.eu>
- [13] Carslaw DC, Beevers SD. The efficacy of low emission zones in central London as a means of reducing nitrogen dioxide concentrations. *Transportation Research Part D:*

- Transport and Environment. 2002 Jan;7(1):49-64.  
doi. 10.1016/S1361-9209(01)00008-6
- [14] Ellison RB, Greaves SP, Hensher DA. Five years of London's low emission zone: Effects on vehicle fleet composition and air quality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2013 Aug;23:25-33.  
doi. 10.1016/j.trd.2013.03.010
- [15] Cyrus J, Peters A, Soentgen J, Wichmann HE. Low emission zones reduce PM10 mass concentrations and diesel soot in German cities. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2014;64(4):481-487.  
doi. 10.1080/10962247.2013.868380
- [16] Malina C, Scheffler F. The impact of Low Emission Zones on particulate matter concentration and public health. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015 July;77:372-385.  
doi. 10.1016/j.tra.2015.04.029
- [17] Qadir RM, Abbaszade G, Schnelle-Kreis J, Chow JC, Zimmermann R. Concentrations and source contributions of particulate organic matter before and after implementation of a low emission zone in Munich, Germany. *Environmental Pollution*. 2013 Apr;175:158-167.  
doi. 10.1016/j.envpol.2013.01.002
- [18] Panteliadis P, Strak M, Hoek G, Weijers E, van der Zee S, Dijkema M. Implementation of a low emission zone and evaluation of effects on air quality by long-term monitoring. *Atmospheric Environment*. 2014 Apr;86:113-119.  
doi. 10.1016/j.atmosenv.2013.12.035
- [19] Bonačić Bartolin P, Bunjevac m, Lulić Z. Vehicle Emissions and Air Quality in the City of Zagreb. *Digital proceedings of the 8<sup>th</sup> European Combustion Meeting*. Dubrovnik, Croatia, 8-21.4. 2017.
- [20] Khreis H, Hoogh K, Nieuwenhuijsen MJ. Full-chain health impact assessment of traffic-related air pollution and childhood asthma. *Environment International*. 2018 May;114:365-375.  
doi. 10.1016/j.envint.2018.03.008
- [21] Ferreira F, Gomes P, Tente H, Carvalho AC, Pereira P, Monjardino J. Air quality improvements following implementation of Lisbon's Low Emission Zone. *Atmospheric Environment*. 2015 Dec;122:373-381.  
doi. 10.1016/j.atmosenv.2015.09.064
- [22] Legac I. *Cestovne prometnice I*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
- [23] Cerovac V. *Tehnika i sigurnost prometa*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2001.
- [24] DIREKTIVA 2009/33/EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA o promicanju čistih i energetski učinkovitih vozila u cestovnom prijevozu. *SLUŽBENI LIST EUROPSKE UNIJE*. 2009 Apr;7(2):299.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009L0033&from=HR>
- [25] Jiang W, Boltze M, Groer S, Scheuevens D. Impacts of low emission zones in Germany on air pollution levels. *Transportation Research Procedia*. 2017;25:3370-3382.  
doi. 10.1016/j.trpro.2017.05.217

## **ZAHVALA**

Zahvaljujemo mentoru, prof. dr. sc. Zoranu Luliću, na pruženoj prilici i ukazanom povjerenju za izradu ovog rada. Također mu se zahvaljujemo na stručnom vodstvu tijekom cjelokupnog istraživanja i pisanja rada, na strpljenju i uloženom trudu, te svim vještinama i znanjima koje smo usvojili tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujemo i tvrtki Centar za vozila Hrvatske d.d. koja nam je ustupila potrebne podatke o broju i strukturi vozila bez kojih izrada ovog rada ne bi bila moguća.

Također se zahvaljujemo i svim ostalim djelatnicima Katedre za motore i vozila Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na savjetima i pomoći tijekom istraživanja.

## SAŽETAK

Tvari koje onečišćuju okoliš štetno utječu na zdravlje ljudi pogoršavajući kvalitetu zraka i ljudskog života. Najveći utjecaj ima izgaranje fosilnih goriva koje je primaran način pogona suvremenih cestovnih motornih vozila. Zbog toga je u područjima s velikom gustoćom prometa, poput velikih gradova, kvaliteta zraka posebno narušena. U ovom su radu prikazan je prijedlog mogućeg način smanjenja koncentracija tih štetnih tvari. Definirano je područje proučavanja, tzv. ekološka zona, te je kroz tri različita scenarija proučavan utjecaj strukture i broja vozila na emisije štetnih tvari. Pomoću matematičkog modela prometa i programskog paketa COPERT: Street Level, izračunata je emisija štetnih tvari (NO<sub>x</sub>, CO i PM) prije i nakon uvođenja predloženih promjena u strukturi vozila u prometu, a na temelju rezultata, zaključeno je o učinkovitosti uvođenja ekološke zone.



## **SUMMARY**

Environmental pollutants also harmfully affect people's health by worsening the air quality and the quality of human life. The greatest impact has fossil fuels. Therefore, the air quality is especially disturbed in areas with high traffic density, such as large cities. This work presents some ways of reducing the pollutant concentrations. The area of study, the so-called ecological zone, has been defined. The influence of vehicle structure and number of pollutant concentrations has been studied through three different scenarios. The pollutant (NOX, CO, PM) emissions before and after traffic structure change were calculated by the COPERT: Street Level package software with a mathematical model of traffic which was developed. Based on the obtained results, it was concluded about the effectiveness of the environmental zone introduction.