

Model za brzo predviđanje emisija iz cestovnog transporta

Pejić, Goran

Doctoral thesis / Disertacija

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:786903>

Rights / Prava: [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Mr. sc. Goran Pejić, dipl. ing. stroj.

MODEL ZA BRZO PREDVIĐANJE EMISIJA IZ CESTOVNOG TRANSPORTA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2019.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
AND NAVAL ARCHITECTURE

Goran Pejić, M.Sc. Mech. Eng.

A MODEL FOR FAST PREDICTION OF ROAD TRANSPORT EMISSIONS

DOCTORAL DISSERTATION

Zagreb, 2019.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Mr. sc. Goran Pejić, dipl. ing. stroj.

MODEL ZA BRZO PREDVIĐANJE EMISIJA IZ CESTOVNOG TRANSPORTA

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Zagreb, 2019.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
AND NAVAL ARCHITECTURE

Goran Pejić, M.Sc. Mech. Eng.

A MODEL FOR FAST PREDICTION OF ROAD TRANSPORT EMISSIONS

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:
Prof. Zoran Lulić, Ph.D.

Zagreb, 2019.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK: 623.437.4:504.7.

Ključne riječi: emisije stakleničkih plinova, motorna vozila, flota vozila, modeliranje

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarsvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: prof. dr. sc. Zoran Lulić

Broj stranica: 157

Broj slika: 112

Broj tablica: 8

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 117

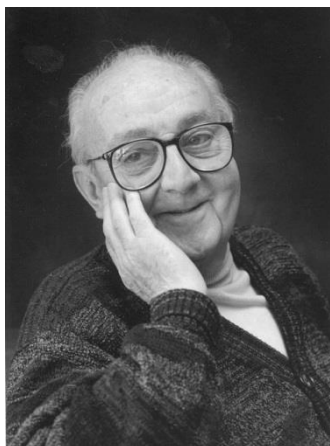
Datum obrane:

Povjerenstvo: doc. dr. sc. Goran Šagi (FSB, Zagreb) - predsjednik povjerenstva

doc. dr. sc. Petar Ilinčić (FSB, Zagreb) - član povjerenstva,

izv. prof. dr. sc. Anita Domitrović (FPZ, Zagreb) - član povjerenstva,

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje



Essentially, all models are wrong, but some are useful.

George Edward Pelham Box,
Professor Emeritus of Statistics
University of Wisconsin-Madison
(1919 – 2013)

Posvećeno mojoj obitelji

ZAHVALA

Zahvaljujem prijateljima i kolegama koji su preuzeli dio mojih dužnosti i bodrili me da ustrajem u dovršenju ovog rada.

Posebno zahvaljujem profesoru Zoranu Luliću na strpljenju i korisnim savjetima tijekom izrade ovoga rada.

U Zagrebu, 1. veljače 2019.

SADRŽAJ

Sažetak	v
Abstract	vi
Popis slika	vii
Popis tablica	xiii
Oznake	xiv
Kratice	xvi
1. Uvod	1
1.1. Ciljevi rada i hipoteze	2
1.2. Objekt istraživanja	4
1.3. Očekivani znanstveni doprinos	4
1.4. Opis rada	5
2. Pregled PODRUČJA ISTRAŽIVANJA	6
2.1. Emisije cestovnih motornih vozila u EU – rubni uvjeti	6
2.2. Modeli za procjenu emisija	9
3. Objekt istraživanja: flota vozila M1 u REPUBLICI HRVATSKOJ	20
3.1. Struktura flote prema vrsti goriva	21
3.2. Struktura flote prema emisijskoj razini	22
3.3. Pokazatelji obnavljanja flote	24
3.4. Prevoženi put flote M1	25
3.5. Emisije flote M1	28
3.6. Emisijski faktori flote M1 i usporedba s drugim izvorima	30
3.7. Profil prosječnog vozila flote M1	36
4. Modeliranje emisija flote vozila	40
4.1. Model za upravljanje emisijama	42
4.1.1. PODMODEL 1: Model za procjenu emisija COPERT 5	43
4.1.2. PODMODEL 2: Prognostički podmodel	48
4.1.2.1. Regresijska analiza parametara flote	49
4.1.2.1.1. Testiranje na povijesnim podacima	54
4.1.2.1.2. Rekonstrukcija 2005. godine	54
4.1.2.1.3. Projekcija prosječnih emisijskih faktora flote do 2030. godine	57
4.1.2.2. Metoda vremenskih nizova	58
4.1.2.2.1. Kratak pregled metode	58
4.1.2.2.2. Mjerenje točnosti prognostičkih modela	65
4.1.2.2.3. Ostale primijenjene statističke veličine	66
4.1.2.3. Formiranje modela ARIMA za flotu vozila kategorije M1	67

4.1.2.4.	Međusobna usporedba primijenjenih ARIMA modela.....	70
4.1.2.5.	Usporedba s drugim modelima	75
4.1.2.6.	Testiranje na povijesnim podacima	76
4.1.2.7.	Konačan zaključak.....	80
4.1.3.	PODMODEL 2: Scenarijski podmodel	80
4.1.3.1.	Matematičko modeliranje difuzije novih tehnologija	80
4.1.4.	PODMODEL 3: Model za upravljanje emisijama	83
4.1.4.1.	Opis modela.....	83
4.1.4.2.	Primjena podmodela	86
4.1.5.	INDIKATORI emisija flote	89
4.2.	Preračunavanje stakleničkih plinova na ekvivalent CO ₂	90
4.3.	Nesigurnost	92
4.3.1.	Definicije i pojmovi	92
4.3.2.	Utjecajne varijable emisija cestovnog transporta	93
4.3.3.	Zaključak	96
4.4.	Dodatak: statističke oznake i simboli.....	97
5.	Scenarijska analiza	101
5.1.	Emisije iz cestovnog transporta u Hrvatskoj 2005. godine	103
5.2.	Granične emisije iz cestovnog transporta u 2030. godini	105
5.3.	Prognostički parametri hrvatske flote M1	105
5.3.1.	Broj vozila i brzina obnavljanja flote	105
5.3.2.	Prosječan godišnji put vozila.....	110
5.3.3.	Emisijski faktori.....	110
5.4.	Prognoze difuzije novih tehnologija	111
5.5.	Scenarijska analiza emisija.....	112
5.6.	Izgledi za difuziju novih tehnologija u Hrvatsku	121
5.7.	Emisijski indikatori	123
5.8.	Zaključci	124
6.	Zaključci i preporuke	125
6.1.	Pregled i glavni rezultati rada	125
6.2.	Potvrđivanje hipoteza.....	127
6.3.	Izvorni znanstveni doprinos.....	127
6.4.	Mogući smjer nastavka rada.....	127
	Popis literature.....	129
	Kratki životopis.....	135
	Résumé	136

SAŽETAK

Cilj ovog rada je definirati funkcijske odnose između emisijske strukture flote putničkih automobila (flota vozila M1 kategorije) i emisija stakleničkih plinova. Na temelju tih odnosa izrađen je model za procjenu i upravljanje emisijama stakleničkih plinova cjelokupnog cestovnog transporta. Model se sastoji od tri podmodela: podmodela za procjenu emisija, prognostičkog podmodela i podmodela za upravljanje emisijama. Funkciju prvog podmodela, za procjenu emisija, obavlja COPERT 5. Drugi se podmodel sastoji od dva dijela: prognostičkog i scenarijskog. U prognostičkom dijelu je za prognoziranje emisijskih faktora flote M1 primijenjena regresijska analiza, a prognoziranje broja vozila u floti i prosječnog godišnjeg puta modelirano je metodom vremenskih nizova ARIMA. Difuzija novih pogonskih sustava xEV u flotu M1 modelirana je u scenarijskom dijelu drugog podmodela, primjenom funkcija difuzije. Utvrđena je vrlo čvrsta korelacija između emisija CO₂ flote M1 i ukupnih emisija stakleničkih plinova cjelokupnog cestovnog transporta u EU-28. Temeljem toga procijenjene su emisije stakleničkih plinova cestovnoga transporta u Republici Hrvatskoj. Pokazano je kako se primjenom tri uvedena indikatora emisija može jednostavno pratiti kretanje godišnjih emisija cestovnog transporta prema postavljenom cilju. Na temelju povijesnih podataka za razdoblje od 2007. do 2016. godine, prognostičkim su dijelom drugoga podmodela rekonstruirane emisije u referentnoj 2005. godini.

U provedenoj scenarijskoj analizi na šest različitih scenarija je pokazano kako bi trebalo usmjeravati redovito godišnje obnavljanje flote da bi se postiglo u Europskoj uniji prihvaćeno obvezujuće smanjenje emisija cestovnog transporta za 30 % do 2030. godine, u odnosu na referentnu 2005. godinu. Također su pokazani izazovi s kojima će se susresti Hrvatska u ispunjavanju ovoga cilja.

Ključne riječi: emisije stakleničkih plinova, motorna vozila, flota vozila, modeliranje emisija, predviđanje

ABSTRACT

The aim of this thesis was to define the functional relationships between the emission structure of the M1 vehicle fleet and greenhouse gas emissions. These relationships were used to develop a model for estimating and managing greenhouse gas emissions from the entire road traffic. The model consists of three sub-models: a sub-model for emission estimation, a forecast sub-model and a sub-model for emission control. The function of the first sub-model for emission estimation is performed by COPERT 5. The second sub-model has two additional sub-models: an additional forecast sub-model and an additional scenario sub-model. In the additional forecast sub-model, regression analysis was used to forecast M1 fleet emission factors, while the ARIMA time series method was used to forecast the number of vehicles in the fleet and the average annual distance travelled. The diffusion of new xEV propulsion systems in the M1 fleet was modelled in the additional scenario sub-model, using diffusion functions. A very strong correlation was observed between CO₂ emissions from the M1 fleet and the total greenhouse gas emissions from the entire road traffic in the EU-28. Greenhouse gas emissions from road traffic in the Republic of Croatia were estimated on the basis of these results. It was demonstrated that the three emission indicators introduced help monitor the achievement of set target values for annual emissions from road traffic. Based on historical data for the period between 2007 and 2016, the additional forecast sub-model was used to reconstruct emissions in the 2005 reference year.

The scenario analysis applied to six different scenarios indicated how the regular annual fleet renewal should be managed in order to achieve the compulsory 30% reduction in road traffic emissions in the European Union by 2030 compared to the 2005 reference year. The thesis outlines the challenges that Croatia will face in meeting this objective.

Keywords: greenhouse gas emissions, motor vehicles, vehicle fleet, emissions modelling, prediction

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Prosječne emisije stakleničkih plinova u Republici Hrvatskoj, izražene kao ekvivalent CO ₂ , prema vrstama izvora [64]	2
Slika 1.2. Emisijski model flote koji počiva na povijesnim podacima mora omogućiti predviđanje i upravljanje budućim emisijama	3
Slika 2.1. Emisije cestovnih motornih vozila – rubni uvjeti (2017-08)	8
Slika 2.2. Različiti pristupi računanju emisija u modelima za procjenu emisija cestovnog transporta [20]	9
Slika 2.3. Prikaz podjele modela cestovnog transporta prema opsegu ulaznih varijabla [22]	10
Slika 2.4. Podjela modela cestovnog transporta [24]	10
Slika 2.5. Usporedba rezultata procjena emisijskim modelima i rezultata mjerenja [25]	13
Slika 3.1. Struktura flote prema kategorijama vozila u RH od 1996 do 2016. godine	21
Slika 3.2. Struktura flote vozila M1 prema vrsti pogonskoga goriva (znakom × označena je točka/godina na koju se odnosi obližnja brojčana vrijednost)	21
Slika 3.3. Prirast broja vozila M1 u odnosu na početnu 2007. godinu	22
Slika 3.4. Struktura flote vozila M1 i njenih glavnih sastavnica prema emisijskoj razini i vrsti pogonskoga goriva: flota ukupno, benzin i dizel	23
Slika 3.5. Struktura marginalnog dijela flote M1 prema emisijskoj razini i vrsti goriva: UNP, SPP i hibridna električna vozila (znakom × označena je sumarna vrijednost u 2016. g.)	23
Slika 3.6. Starosna struktura flote M1 u pojedinim kalendarskim godinama	24
Slika 3.7. Broj i emisijska struktura prvi put registriranih vozila M1	24
Slika 3.8. Broj prvi put registriranih (novih + rabljenih) vozila i broj otpadnih/odjavljenih vozila u floti M1	25
Slika 3.9. Udjeli vozila u floti, prema vrsti goriva i projekcije do 2030. godine	25
Slika 3.10. Ukupan prevoženi put flote M1 i prosječan godišnji put vozila prema pogonskom gorivu i emisijskoj razini vozila. Hibridi i SPP vozila nisu prikazani, jer je njihov udio u ukupnom broju vozila M1 i u prevoženom putu zanemarivo malen (vidi sliku 3.2.).	26
Slika 3.11. Omjeri ukupnog prevoženog puta (lijevo) i broja vozila u floti (desno)	27
Slika 3.12. Struktura prevoženog puta vozila M1 prema vrsti pogonskoga goriva	27
Slika 3.13. Godišnji put vozila kao postotak prosječnog puta, u ovisnosti od starosti vozila	27
Slika 3.14. Emisije (COPERT 5) flote M1 prema vrsti goriva i emisijskoj razini vozila	28
Slika 3.15. Emisije flote M1 prema vrsti goriva i emisijskoj razini vozila (nastavak)	29

Slika 3.16. Prosječni emisijski faktori Flote M1 u 2016. godini (samo za CO ₂ : g/km) - dio 1 od 2	31
Slika 3.17. Prosječni emisijski faktori Flote M1 u 2016. godini (samo za CO ₂ : g/km) - dio 2 od 2	32
Slika 3.18. Relativne promjene emisijskih faktora od 2007. do 2016. godine, cjelokupne flote M1 i njenih sastavnica prema vrsti goriva.....	33
Slika 3.19. Sastojci u ispušnim plinovima ograničeni homologacijskim propisima: usporedba prosječnih emisijskih faktora u 2016. g. i homologacijskih granica [1]	34
Slika 3.20. Emisijski faktori CO ₂ prema priručniku HBEFA 3.2 u ispitnom ciklusu CADC prosječnog automobila pogonjenog Ottovim motorom (lijevo) i Dieselovim (desno) [51].....	35
Slika 3.21. Veliko rasipanje emisijskih faktora NO _x kod mjerenja na 154 automobila sa Dieselovim motorom u ciklusu CADC koji dobro predstavlja uvjete stvarne vožnje [58]	35
Slika 3.22. Prosječni emisijski faktori NO _x njemačke flote M1 prema HBEFA 3.2 (objavljeno 2014.) i HBEFA 3.3. (objavljeno krajem 2016.) [52].....	36
Slika 3.23. Emisijski faktori NO _x za nizozemsku flotu M1 u 2015. godini: počevši od Euro 3 stvarne emisije su veće od dopuštenih. [60].....	36
Slika 3.24. Prosječna vozila flote M1 prema vrstama goriva: snaga i radni obujam motora	38
Slika 3.25. Prosječna vozila flote M1 prema vrstama goriva: masa vozila i prosječna starost	38
Slika 3.26. Prosječna vozila flote M1 prema vrstama goriva: emisije CO ₂ i potrošnja goriva (kod UNP izražena ekvivalentom benzina)	39
Slika 3.27. Porast broja automobila sa Dieselovim motorom i opadanje prosječnog godišnjeg puta flote M1.....	39
Slika 4.1. Stablo odlučivanja i odabira razine emisijskog modela prema.....	41
Slika 4.2. Blok shema modela MOCET (početna godina je: j = 2005)	43
Slika 4.3. Pregled primjene modela za procjenu emisija cestovnog transporta u Europi [65]	44
Slika 4.4. Shema izračuna emisija pomoću programskog paketa COPERT 5 [17]	45
Slika 4.5. Ravnoteža energija, izračunata potrošnja energije mora biti jednaka statističkoj, u emisijskim modelima Tier 3 [62]	46
Slika 4.6. Korigiran i iskrivljen emisijski faktor (lijevo) i nekorigiran (desno)	46
Slika 4.7. Podjela modela na statičke i dinamičke [23]	48
Slika 4.8. Prosječan godišnji prevoženi put po vozilu triju glavnih skupina u floti M1.	49
Slika 4.9. Ukupan godišnji prevoženi put triju glavnih skupina vozila u floti M1 i prevoženi put pojedinih emisijskih razina	49

Slika 4.10. Kod nelinearne regresije R^2 ne opisuje dobro kvalitetu prilagodbe. Lijevo: kvadratni polinom, $R^2 = 0,93$, dobra prilagodba (crvena krivulja) stvarnim vrijednostima (crna krivulja) na lijevom rubu promatranog intervala. Desno: polinom 6. stupnja, znatno veći R^2 , ali loša prilagodba na oba ruba intervala.	51
Slika 4.11. Primjer prilagodbe prevoženog puta vozila flote M1 po vrstama pogonskih goriva	53
Slika 4.12. Primjer prilagodbe emisijskog faktora vozila flote M1 po emisijskim razinama	53
Slika 4.13. Prognoza broja vozila za poznatu 10. godinu temeljem 9 povijesnih podataka. Podaci su prikazani punim markerima spojenima debelim crtama, regresijske krivulje tankim crtama, a podaci za desetu godinu tankim križićem.	54
Slika 4.14. Usporedba indeksa prosječnog godišnje prevoženog puta u Hrvatskoj i u Europskoj uniji	55
Slika 4.15. Primjer aproksimacije emisijskog faktora polinomom 3. stupnja uz dobru prilagodbu na lijevom i desnom rubu intervala poznatih vrijednosti	55
Slika 4.16. Prosječan godišnji put po vozilu (lijevo) i ukupan godišnji prevoženi put (desno). (Podaci od 2007. do 2016. Prognoza u 2005., 2006. i 2017. godini.)	56
Slika 4.17. Indeksi ukupnih emisija (lijevo) i emisijskih faktora EF (desno) hrvatske flote M1 (Podaci od 2007. do 2016. Prognoza u 2005., 2006. i 2017. godini.)	56
Slika 4.18. Projekcije emisijskih faktora flote M1 u cjelini i po gorivima do 2030. godine.	57
Slika 4.19. Vremenski niz (gore) rastavljen na svoje komponente: trend (u sredini) i sezonsku komponentu (dolje)[20]	60
Slika 4.20. Opća metoda razvoja i izbora modela za vremenske nizove [69]	62
Slika 4.21. Vremenski niz broja vozila u floti M1. Vrijednosti niza nacrtane su u dva dijagrama različitih raspona osi Y da bi se pokazalo da subjektivan vizualni dojam uzlaznog trenda jako ovisi o odabranom rasponu osi Y.	67
Slika 4.22. Korelogrami izvornog niza broja vozila u floti M1 i niza njegovih prvih diferencija. Ucartane su granice pouzdanosti (upper, lower) za razinu signifikantnosti $\alpha = 0,05$. (Na osi X su lag-ovi, odnosno red koeficijenta autokorelacije/parcijalne autokorelacije.)	68
Slika 4.23. Usporedba prognoza i reziduala odabranih modela ARIMA	73
Slika 4.24. Usporedba prognoza i reziduala odabranih modela ARIMA - nastavak	74
Slika 4.25. Prognozička funkcija <i>forecast</i> modela ARIMA unutar intervala podataka	75
Slika 4.26. Usporedba prognoze modelom ARIMA i regresijskim polinomom 2. stupnja	75
Slika 4.27. Prognoza broja i strukture vozila kategorije M1 u Hrvatskoj[79]	76
Slika 4.28. Prognoza trostrukim eksponencijalnim zaglađivanjem (Excel 2016, FORECAST.ETS)	76
Slika 4.29. Testiranje modela ARIMA na povijesnim podacima. Niz za formiranje modela završava u gornjem redu s 2005. godinom, a u donjem redu s 2008. (lijevo) i 2011. (desno).	77

Slika 4.30. Testiranje modela ARIMA(p,q,d=1,1,1) na povijesnim podacima. Prognoza od 2006. godine (lijevo) je promašaj, a od 2009. (desno) ne može biti bolja!	77
Slika 4.31. Testiranje modela ARIMA(p,q,d=1,1,1) na povijesnim podacima (gore) i unutarnji ustroj prognostičkog procesa (dolje)	78
Slika 4.32. Primjer testiranja modela ARIMA(p,q,d=2,1,1) s diferenciranjem izvornog niza duljine 105 članova i s prognozom za narednih pet članova (gore) i unutarnji ustroj prognostičkog procesa (dolje).	79
Slika 4.33. Koncept S-krivulje: četiri faze životnog vijeka nove tehnologije	81
Slika 4.34. Krivulja rasta logističkog modela Lt definirana parametrima M , ts , Δt , u i v [86].....	82
Slika 4.35. Primjer krivulje rasta Bass-ovog modela Bt i njena prva derivacija [86]	83
Slika 4.36. Shema izračuna u podmodelu za upravljanje emisijama Oznake: y – broj vozila (crvena krivulja), E – emisije vozila y (zelena krivulja)	84
Slika 4.37. Prognoze emisija flote poslije 2016. (lijevo) i emisijskog faktora flote (desno) izračunate s konstantnom ($S = 4\%$) i s varijabilnom (S_{var}) godišnjom stopom smanjivanja.....	87
Slika 4.38. Prognoza prosječnog godišnje prevoženog puta metodom ARIMA.....	88
Slika 4.39. Prognoza emisija CO ₂ flote M1 u RH do 2030. godine	88
Slika 4.40. Emisijski faktor flote M1 za tri razmatrana slučaja	89
Slika 4.41. Hipotetički primjer praćenja odstupanja stvarnih emisija flote (crni križići) od (plave) prognoze upravljačkog modela koja vodi prema cilju. Emisije u 2018. godini premašile su prognostičku vrijednost za približno 5 %.....	89
Slika 4.42. Omjer emisija CO ₂ vozila kategorije M1 i ukupnih emisija stakleničkih plinova cestovnog transporta (izraženih kao maseni ekvivalent CO ₂) u zemljama EU-28. U crtani su pravci trenda za cijelo razdoblje od 1995. do 2016. (plava krivulja) i od 2005. (crvene točke).	91
Slika 4.43. Ilustracija točnosti i preciznosti: (a) netočno, ali precizno, (b) netočno i neprecizno, (c) točno, ali neprecizno, (d) točno i precizno. [99]	93
Slika 4.44. Primjer varijabilnosti rezultata mjerenja emisijskih faktora. Izvor: Kouridis et al. (2010) [100].....	94
Slika 5.1. Prognoza emisija ICCT-a za 2020., 2025. i 2030. godinu na temelju podatak za 2005., 2010. i 2015.	101
Slika 5.2. Za svaki period od 50 godina dijagram pokazuje zbroj godina u ratu za sve europske države (vlastiti prikaz prema [103])	102
Slika 5.3. Kretanje cijena barela sirove nafte od 1946. do 2017. godine: 1980. – početak rata između Irana i Iraka; 1990. – Irak napao Kuvait, Zaljevski rat; 2005. – referentna godina za smanjivanje emisija; 2008. – rat u Gazi; Arapsko proljeće, rušenje Gadafija; 2013.-2014. – nastavak rata u Libiji	102
Slika 5.4. Emisije iz cestovnog transporta u Hrvatskoj prema službenim izvorima (srednje dvije krivulje) i procjenama ovoga rada (gornja i donja krivulja)	103
Slika 5.5. Prognoza broja vozila flote M1 do 2030.	106

Slika 5.6. Prognoza broja vozila (ARIMA (p,q,d=1,1,0)) i na osnovi nje izračunat godišnji prirast broja vozila (sivi stupci: povijesni podaci, plavi stupci: prognoza).....	106
Slika 5.7. Mogući načini prognoziranja broja prvi put registriranih vozila (crvene brojeke su oznake stupaca u tablici 5.1.).....	107
Slika 5.8. Primjer prognoza broja prvi put registriranih vozila izračunatih regresijskim funkcijama i metodom ARIMA.....	108
Slika 5.9. Tri scenarija obnavljanja flote. Brojevi (5a) do (6c) označavaju stupce u tablici 5.1.	108
Slika 5.10. Prognoza prosječnog godišnje prevoženog puta flote M1 do 2030.	110
Slika 5.11. Emisijski faktori CO ₂ hrvatske flote M1 po pojedinim vrstama goriva (od 2007. do 2016. podaci izračunati programom COPERT 5, ostalo linearna regresija)	110
Slika 5.12. Prognoze difuzije novih pogonskih sustava BEV i PHEV [109]	111
Slika 5.13. Prognoza udjela vozila s novim pogonskim sustavima u prodaji novih vozila na svjetskoj razini [110]	111
Slika 5.14. Proces formiranja scenarija	112
Slika 5.15. Scenarij 1: Prognoza emisija cestovnog transporta kod zadržavanja trenda EF CO ₂	113
Slika 5.16. Scenarij 2: projekcije udjela vozila prema vrstama goriva do 2030. godine.	114
Slika 5.17. Scenarij 2: Emisije kod zadržavanja trendova omjera Automobila sa Ottovim i Dieselovim motorom.	114
Slika 5.18. Scenarij 3: Udio novih sustava u prvi put registriranim vozilima (lijevo) i njihov broj u floti M1 (desno)	115
Slika 5.19. Scenarij 3: Broj vozila u hrvatskoj floti M1	115
Slika 5.20. Scenarij 3: Emisije stakleničkih plinova cjelokupne flote cestovnih vozila. Plavi stupci pokazuju smanjenje emisija uslijed difuzije baterijskih električnih vozila umjesto vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem. Emisije iznad crvene crtkane krivulje su premašaj koji onemogućava ciljane vrijednosti u 2030. godini.	116
Slika 5.21. Scenarij 4: Udio novih sustava u prvi put registriranim vozilima (lijevo) i njihov broj u floti M1 (desno)	116
Slika 5.22. Scenarij 4: Broj vozila u hrvatskoj floti M1	117
Slika 5.23. Scenarij 4: Emisije stakleničkih plinova cjelokupne flote cestovnih vozila. Plavi stupci pokazuju smanjenje emisija uslijed difuzije baterijskih električnih vozila umjesto vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem.	117
Slika 5.24. Scenarij 5: Emisije stakleničkih plinova cjelokupne flote cestovnih vozila. Plavi stupci pokazuju smanjenje emisija uslijed difuzije baterijskih električnih vozila umjesto vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem.	118
Slika 5.25. Scenarij 6: Udio novih sustava u prvi put registriranim vozilima (lijevo) i njihov broj u prvi put registriranim vozilima M1 (desno).....	119

Slika 5.26. Scenarij 6: Broj vozila u hrvatskoj floti M1.	119
Slika 5.27. Scenarij 6: Emisije stakleničkih plinova cjelokupne flote cestovnih vozila. Plavi stupci pokazuju smanjenje emisija uslijed difuzije baterijskih električnih vozila umjesto vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem.	119
Slika 5.28. Emisijski faktori flote M1 u svih šest scenarija.	120
Slika 5.29. Hrvatska flota u 2030. godini. Scenarij 1: zeleni stupac sadrži sva xEV (HEV+PHEV+BEV). Scenarij 2: zeleni stupac sadrži (xEV+UNP). 1. registracije su na lijevoj skali.	120
Slika 5.30. Emisije cestovnog transporta u 2030. godini: crni stupci u odnosu na ciljanu vrijednost NIR od 3,7 Mt CO ₂ -ekv; plavi stupci u odnosu na ispravnu ciljanu vrijednost od 4,9 Mt CO ₂ -ekv. Scenariji 4 i 6 (Sc-4 i Sc-6) postižu ciljanu vrijednost NIR, a ispod su ispravne ciljane vrijednosti. Siva krivulja je prosječan godišnji put vozila u 2030. godini u pojedinim scenarijima.....	120
Slika 5.31. S porastom mase baterije raste doseg električnog vozila, ali opada korisnost	121
Slika 5.32. Cijene putničkih automobila, s novim pogonskim sustavima, u Hrvatskoj na dan 22.10.2018. godine	122
Slika 5.33. BDP prema podacima Eurostata.	122
Slika 5.34. Tri emisijska indikatora flote M1 (broj vozila, godišnji put vozila i emisijski faktor) za dvije ciljane emisije cjelokupnog cestovnog transporta <i>E2030</i> s ucrtanim točkama dvaju uspješnih scenarija Sc-4 i Sc-6.	123

POPIS TABLICA

Tablica 1.1. Sastav ispušnih plinova cestovnih motornih vozila	1
Tablica 3.1. Prosječni emisijski faktori flote M1 u 2016. godini (crvene/sive ćelije – maksimalna/minimalna vrijednost retka/zadnjeg stupca).	30
Tablica 3.2. Profil prosječnih vozila flote M1 po vrstama goriva u razdoblju od 2007. do 2016. godine	37
Tablica 4.1. Primjer prilagodbe emisijskih faktora [g/km] vozila M1 pogonjenih benzinom u razdoblju od 2007. do 2016. godine (u prvom stupcu su krivulje stvarnih vrijednosti; obojene ćelije sadrže visoke vrijednosti u retku).....	52
Tablica 4.2. Rekonstruirane i COPERT-om procijenjene emisije od 2005. do 2017. godine.	56
Tablica 4.3. Usporedba statističkih pogrešaka i kriterija odabranih modela ARIMA.....	72
Tablica 4.4. Staklenički plinovi u ispuhu motora cestovnih vozila i njihove vrijednosti Potencijala globalnog zatopljenja <i>GWP</i> 100 u odnosu na CO ₂ [96]	90
Tablica 5.1. Prognostički parametri i rezultati prognoza svih vozila hrvatske flote M1	109

OZNAKE

Latinične oznake

ACF	- autokorelacijska funkcija (<i>engl. AutoCorrelation Function</i>)
a, b	- parametri logističke funkcije difuzije (novih tehnologija u tržište)
ARIMA	- metoda autoregresijskih integriranih pokretnih prosjeka (<i>engl. AutoRegressive Integrated Moving Average</i>)
B	- funkcija (S-krivulja) Bass-ovog modela difuzije (novih tehnologija u tržište)
e_i	- pogreška prognozirane vrijednosti $\hat{y}_i$
E_j, g, t, Mt	- emisije tvari u kalendarskoj godini j
$EF, g/km$	- emisijski faktor, npr. za dušikove okside: $EFNO_x$
F_t, F_{t+m}	- prognozirana vrijednost za period $t, t + m$
GWP_{100}	- potencijal globalnog zatopljenja (<i>engl. Global Warming Potential</i>) za horizont od 100 godina
i	- kalendarska godina; vrsta goriva
j	- kalendarska godina; emisijski sastojak
L	- logistička funkcija (S-krivulja) difuzije (novih tehnologija u tržište)
M	- kapacitet tržišta
MAE	- srednja apsolutna pogreška (<i>engl. Mean Absolute Error</i>)
$MAPE$	- srednja apsolutna postotna pogreška (<i>engl. Mean Absolute Percentage Error</i>)
$MASE$	- srednja apsolutna skalirana pogreška (<i>engl. Mean Absolute Scaled Error</i>)
MCF	- korekcijski faktor prosječnog godišnjeg puta vozila (<i>engl. Mileage Correction Factor</i>)
MPE	- srednja postotna pogreška (<i>engl. Mean Percentage Error</i>)
MSE	- srednja kvadratna pogreška (<i>engl. Mean Squared Error</i>)
$N_j, N_j^{1.REG}, N_j^{OTP}$	- broj registriranih vozila, prvi put registriranih vozila, otpadnih vozila u kalendarskoj godini j
$PACF$	- funkcija parcijalne autokorelacije (<i>engl. Partial Autocorrelation Function</i>)
p, d, q	- parametri modela ARIMA
p, q	- parametri Bass-ovog modela difuzije
R	- koeficijent korelacije
R^2	- koeficijent determinacije
$RMSE$	- korijen srednje kvadratne pogreške (<i>engl. Root Mean Squared Error</i>)
$SMAPE$	- simetrična srednja apsolutna postotna pogreška (<i>engl. Symetric Mean Absolute Percentage Error</i>)
$S, S_{var}, \%$	- (konstantna) stopa smanjivanja emisija, varijabilna stopa smanjivanja emisija
s, km	- prosječan godišnji put vozila
SS	- aritmetička sredina (<i>engl. Sum of Squares</i>)

$SSE_{Explained}$	- ukupan zbroj kvadrata razlika točaka modela i stvarnih točaka objašnjen (regresijskim) modelom (engl. <i>total Sum of Squares of Errors</i>)
SSE	- zbroj kvadrata pogrešaka (engl. <i>Sum of Squares of Errors</i>)
$SS_{Residual}$	- ukupan rezidualni zbroj kvadrata razlika točaka modela i stvarnih (izmjenjenih) točaka ili zbroj kvadrata pogrešaka SSE (engl. <i>Sum of Squares Residual</i>)
$SSTotal$	- ukupan zbroj kvadrata razlika izmjerenih vrijednosti i njihove aritmetičke sredine SS (engl. <i>Sum of Squares Total</i>)
t	- vrijeme (u funkcijama difuzije novih tehnologija u tržište)
t_s	- početna vremenska točka (u Bass-ovom modelu difuzije)
$u, v, \Delta t$	- parametri Bass-ovog modela difuzije novih tehnologija u tržište
x	- nezavisna varijabla
$x_j^{1.REG}, x_j^{OTP}$	- udio prvi put registriranih vozila u floti M1, otpadnih vozila u floti M1 u kalendarskoj godini j
$y(x)$	- regresijska funkcija
y_i	- izmjerena vrijednost (npr. broj registriranih vozila) u godini i
$\bar{y}$	- aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti
$\hat{y}_i$	- točka modela tj. točka na krivulji regresijske funkcije
Y	- vremenski niz
Y_1	- prva diferencija vremenskog niza
Y_t	- izmjerena vrijednost u periodu t

Grčke oznake

α	- težinska konstanta
β	- faktor zaglađivanja trenda
γ	- faktor zaglađivanja sezonalnosti
σ	- standardna devijacija populacije

KRATICE

ACEA	- Europska udruga proizvođača automobila (<i>engl. European Car Manufacturer Association</i>)
AIC	- Akaike pokazatelj prilagodbe (<i>engl. Akaike Information Criterion</i>) i
BIC	- Bayesian pokazatelj prilagodbe (<i>engl. Bayesian Information Criterion</i>)
BEV	- baterijsko električno vozilo (<i>engl. Battery Electric Vehicle</i>)
BDP	- bruto domaći proizvod
CADC	- Opći ispitni ciklus ARTEMIS (gradski dio, izvangradski dio, MW – autocesta) (<i>engl. Common Artemis Driving Cycle (urban, rural, MW = motorway)</i>)
CVH	- Centar za vozila Hrvatske
CORINAIR	- inventar emisija onečišćujućih tvari u zrak (<i>engl. CORE INventory of AIR emissions</i>)
DPF	- filter čestica (<i>njem. Dieselpartikelfilter; engl. Diesel Particulate Filter</i>)
EEA	- Europska agencija za zaštitu okoliša (<i>engl. European Environment Agency</i>)
ECE	- Ekonomska komisija za Europu (<i>engl. Economic Commission for Europe</i>)
EK	- Europska komisija
EMEP	- Europski program za nadgledanje i procjenu (<i>engl. The European Monitoring and Evaluation Programme</i>)
ETS	- sustav trgovanja emisijama (<i>engl. Emissions Trading System</i>)
GHG	- staklenički plin (<i>engl. GreenHouse Gas</i>)
HBEFA	- Priručnik za emisijske faktore cestovnog transporta (<i>engl. The Handbook Emission Factors for road transport</i>)
HEV	- hibridno električno vozilo (<i>engl. Hybrid Electric Vehicle</i>)
IMF	- Međunarodni monetarni fond (<i>engl. International Monetary Fund</i>)
IPCC	- Međuvladin panel o klimatskim promjenama (<i>engl. Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
IR	- infracrveno (<i>engl. InfraRed</i>)
JRC	- Zajednički istraživački centar Europske komisije (<i>engl. Joint Research Centre, European commission</i>)
MCF	- korekcijski faktor prosječnog godišnjeg puta vozila (<i>engl. Mileage Correction Factor</i>)
MOCET	- MO del za upravljanje emisijama iz CE stovnog T ransporta
NEDC	- Novi europski ispitni ciklus (<i>engl. New European Driving Cycle</i>)
NFR	- nomenklatura za izvješćivanje (<i>engl. Nomenclature For Reporting</i>)
NIR	- Nacionalno izvješće o emisijama (<i>engl. National Inventory Report</i>)
NMHC	- nemetanski ugljikovodici (<i>engl. Non-Methane Hydrocarbons</i>)

NMVOC	- nemetanski hlapivi organski spojevi (<i>engl. Non-Methane Volatile Organic Compounds</i>)
PAHs	- policiklički aromatski ugljikovodici (<i>engl. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons</i>)
PEMS	- prijenosni sustav za mjerenje emisija (<i>engl. Portable Emissions Measurement Systems</i>)
PHEM	- emisijski model za putničke automobile i teška vozila (<i>engl. Passenger car and Heavy duty Emission Model</i>)
PHEV	- utično električno vozilo (<i>engl. Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>)
PM/PN	- čestice mjerene masom/brojem čestica (<i>engl. Particulate (matter) Mass/Number</i>)
POPs	- postojeane organske onečišćujuće tvari (<i>engl. Persistent Organic Pollutants</i>)RDE - emisije u stvarnim uvjetima vožnje (<i>engl. Real-Driving Emissions</i>)
RSD	- uređaj za daljinsko očitavanje (<i>engl. Remote Sensing Device</i>)
SCR	- selektivna katalitička redukcija (<i>engl. Selective Catalytic Reduction</i>)
SEMS	- pametan sustav za mjerenje emisija (<i>engl. Smart Emissions Measurement System</i>)
SP	- staklenički plinovi
SPP	- stlačeni prirodni plin
UBA	- Agencija za zaštitu okoliša SR Njemačke (<i>njem. Umweltbundesamt</i>)
UNP	- ukapljeni naftni plin
UV	- ultraljubičasto (<i>engl. Ultraviolet</i>)
VKT	- prevoženi put vozila u kilometrima (<i>engl. Vehicle Kilometres Travelled</i>)
VOC	- hlapivi organski spojevi (<i>engl. Volatile Organic Compounds</i>)
WLTP	- Svjetski ispitni ciklus za laka vozila (<i>engl. Worldwide Light duty Test Procedure</i>)
WMTC	- Svjetski ispitni ciklus za motocikle (<i>engl. World Motorcycle Test Cycle</i>)
xEV	- oznaka za HEV, PHEV i BEV

1. UVOD

U ispušnim plinovima cestovnih motornih vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem nalaze se sastojci prikazani u tablici 1.1. koji su ograničeni ECE pravilnicima, odnosno koji se prema kriterijima IPCC-a ubrajaju u stakleničke plinove.

Tablica 1.1. Sastav ispušnih plinova cestovnih motornih vozila

Sastojak	ECE pravilnicima ograničeni sastojci [1]	Staklenički plinovi prema IPCC [2]
CO ₂		X
CH ₄		X
N ₂ O		X
THC	X	
NMHC	X	
NO _x ¹	X	
CO	X	
PM ²	X	
PN ²	X	

Procjena emisija transporta postaje sve značajnijom u raspravama o problemima kakvoće zraka, klimatskim promjenama i politikama njihovih ublažavanja, uslijed stalnog rasta korištenja vozila i pogoršanja uvjeta vožnje zbog zagušenja transporta. Modeliranje stanja prema unaprijed postavljenim scenarijima te njihova kvantifikacija danas je postalo nezaobilaznim alatom u donošenju odluka. Na temelju takvih simulacija Europska je komisija (EK) izradila niz uspješnih procjena utjecaja politika EK na klimatske promjene [4].

Emisije štetnih tvari iz cestovnih vozila ograničene su u prvom redu obvezujućim smanjenjem ukupnih emisija stakleničkih plinova usvojenim **Kyoto protokolom** [5], zatim na temelju njega usvojenim obvezujućim ciljevima Europske Unije [6] te naposljetku homologacijskim propisima [7] implementiranima kroz direktive EU. Od samih početaka, Europska Unija ima

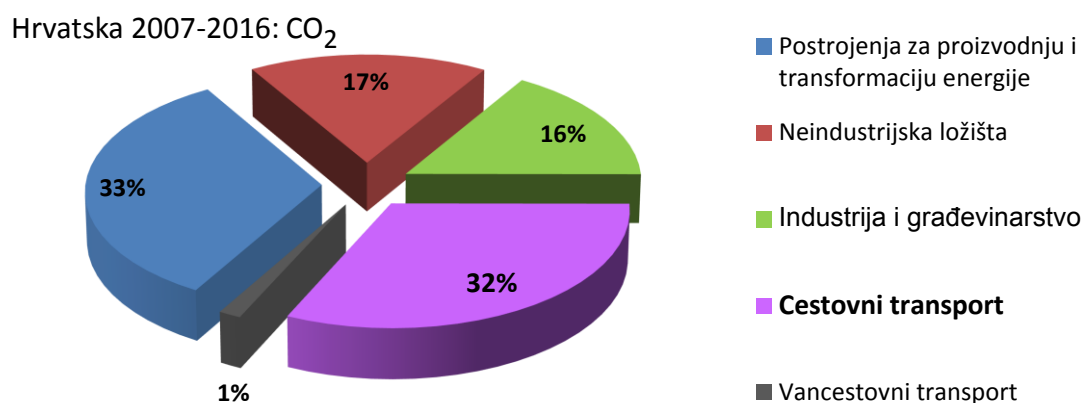
¹ Pojam dušikovi oksidi obuhvaća sedam oksida: NO, NO₂, NO₃, N₂O, N₂O₃, N₂O₄ i N₂O₅. Ovi oksidi nastaju za vrijeme izgaranja. Najvažniji predstavnici ovih oksida su dušikov monoksid NO i dušikov dioksid NO₂. Omjer NO/NO₂ iznosi u sirovim emisijama Ottovog motora (prije katalizatora) preko 0,99. Najveća koncentracija NO_x javlja se kod blago siromašne smjese tj. kod 5 % do 10 % viška zraka. (Van Basshuysen [3], str. 935)

² PM / PN – čestice mjerene masom / brojem (engl. Particulate Mass / Number).

vodeću ulogu u međunarodnoj klimatskoj politici, a njeni ciljevi usmjereni prema smanjenju emisija CO₂ od cestovnog transporta su najzahtjevniji u svijetu. Međutim, kako bi zadržala taj status EU će morati odgovoriti brojnim novim izazovima, od kojih treba posebno istaknuti permanentno jačanje zakonskih okvira za povećanje energetske učinkovitosti, za smanjenje emisija stakleničkih plinova i za povećanje udjela energije iz obnovljivih izvora [8]. U okviru ovakve politike, *Europsko vijeće je prihvatilo 24.10.2014., kao obvezujući cilj EU-a, smanjenje emisija stakleničkih plinova do 2030. godine u odnosu na 2005. za 30 % u sektorima izvan ETS-a*³ [9]. U ove sektore ubraja se cestovni transport.

Kao nastavak Kyoto protokola u Parizu je 12. prosinca 2015. godine usvojen **Pariški sporazum o klimatskim promjenama** koji je stupio je na snagu 4. listopada 2016. godine nakon što ga je ratificirala Europska unija. Na temelju Pariškog sporazuma Vijeće Europske unije 10. listopada prošle godine izradilo je prijedlog nove uredbe kojom će se, kada stupi na snagu, donijeti mjere za daljnje postroženje dopuštenih emisija CO₂ iz lakih vozila.⁴

U Republici Hrvatskoj emisije stakleničkih plinova iz cestovnog transporta, u razdoblju od 2007. do 2016. godine, čine gotovo jednu trećinu ukupnih emisija stakleničkih plinova. Cestovni transport je drugi po veličini izvor ovih plinova i gotovo je izjednačen s najvećim izvorom, postrojenjima za proizvodnju i transformaciju energije (slika 1.1.).



Slika 1.1. Prosječne emisije stakleničkih plinova u Republici Hrvatskoj, izražene kao ekvivalent CO₂, prema vrstama izvora [64]

1.1. Ciljevi rada i hipoteze

Da bi mogla učinkovito i sa što manje troškova ispunjavati svoje obveze članice Europske unije, Republika Hrvatska mora imati na raspolaganju ne samo modele za procjenu emisija štetnih tvari iz cestovnog transporta u proteklom razdoblju, nego i modele koji će omogućiti predviđanja te na temelju njih izradu i brzu analizu mogućih scenarija. U uobičajenim

³ ETS - Emissions Trading System, u prijevodu Sustav trgovanja emisijama.

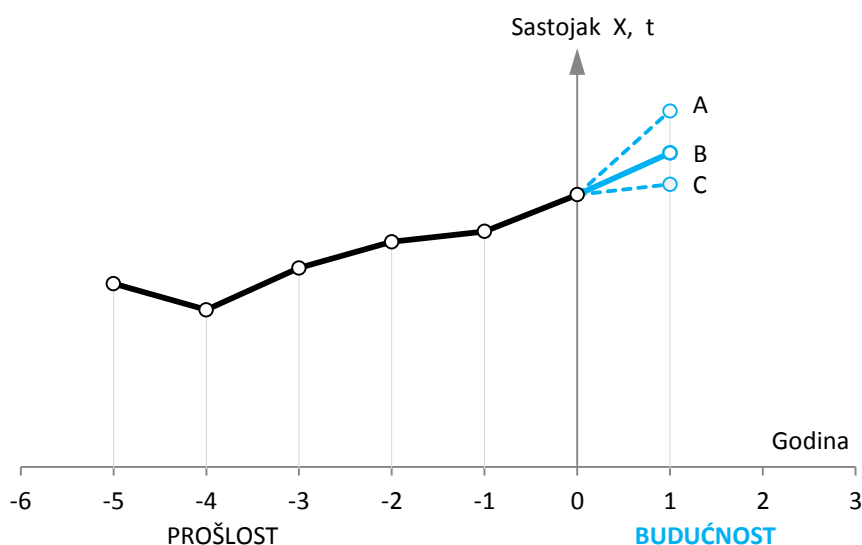
⁴ Prijedlog UREDBE EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA o utvrđivanju standardnih vrijednosti emisija za nove osobne automobile i za nova laka gospodarska vozila kao dio integriranog pristupa Unije s ciljem smanjivanja emisija CO₂ iz lakih vozila te o izmjeni Uredbe (EZ) br. 715/2007 (preinaka), Bruxelles, 10. listopada 2018., 12903/18, br. dok. Kom.: 14217/1/17 REV1 - COM(2017)676 final/2.

modelima za procjenu emisija koji se primjenjuju za prikupljanje statističkih podataka, a koji se službeno dostavljaju nadležnim europskim institucijama, emisije iz motornih vozila se načelno računaju prema sljedećem izrazu:

$$\text{Emisija [g]} = \text{emisijski faktor [g/km]} \times \text{prevoženi put [km]}.$$

Ovakav pristup zahtijeva unošenje velikog broja podataka o kompletnoj floti vozila u državi. Primjerice, računalni program COPERT, koji se primjenjuje u većini članica Europske Unije, pa tako i u Republici Hrvatskoj, razvrstava vozila u gotovo 400 kategorija, a za svaku od njih treba unijeti niz podataka o transportnim aktivnostima, karakteristikama prometnica i utrošenom gorivu. Takvi programi su vremenski krajnje zahtjevni, što povećava troškove, a nisu ni prikladni za brze analize. U modelu za upravljanje i analizu emisija iz cestovnog transporta MOCET, razvijenom tijekom izrade ovoga rada, primijenjena su drugačija načela. Povijesni podaci o emisijama flote procijenjenima modelom COPERT 5, koji se ovdje pojavljuje kao jedan od tri podmodela, čine podlogu za izradu projekcija, odnosno scenarija u budućnosti. Ovi se podaci koriste u prognostičkom podmodelu koji pokazuje kakvi će biti ishodi u bližoj ili daljnjoj budućnosti zadrže li se sadašnji trendovi. Nasuprot tome, podmodel za upravljanje emisijama pokazuje kakve će biti emisije flote u cjelini ako se provedu pretpostavljene ciljane izmjene emisijske strukture vozila koja svake godine ulaze u flotu. Pritom nije potrebno za svaku buduću godinu provoditi vremenski veoma zahtjevnju procjenu COPERT-om, već se primjenjuje brzi algoritam novog upravljačkog podmodela. Time su stvoreni preduvjeti za scenarijsku analizu emisija flote vozila u Republici Hrvatskoj. To će omogućiti donošenje odluka o poticajnim politikama kojima će se obnavljanje flote i razvoj njihovih emisija usmjeravati prema željenom cilju.

Na slici 1.2. je grafički prikaz s tri moguća scenarija (A, B, C).



Slika 1.2. Emisijski model flote koji počiva na povijesnim podacima mora omogućiti predviđanje i upravljanje budućim emisijama

Za flotu vozila u Republici Hrvatskoj postoje pouzdani podaci o njenom sastavu od 2007. godine. Temeljem tih podataka procijenjene su emisije cestovnog transporta [10]. Polazište

ovog rada je da ovi podaci čine dovoljno dobru osnovu za izradu brzog modela za procjenu budućih emisija iz cestovnog transporta.

Hipoteze rada su:

1. Na temelju podataka o strukturi flote vozila mogu se definirati funkcijski odnosi između emisijske strukture flote i emisija flote
2. Na temelju tih odnosa može se izraditi matematički model kojim će se moći dovoljno točno prognozirati budući razvoj emisija flote tijekom nekoliko narednih vremenskih koraka

1.2. Objekt istraživanja

Objekt istraživanja je flota putničkih automobila (kategorije M1) u Republici Hrvatskoj. Materijale za provedbu istraživanja čine dvije glavne skupine podataka:

1. podaci u središnjoj bazi podataka registriranih cestovnih vozila u Republici Hrvatskoj Centra za vozila Hrvatske i u Ministarstva unutarnjih poslova koji se prikupljaju tijekom redovitih tehničkih pregleda i registracije vozila
2. podaci o godišnjim emisijama flote vozila procijenjenim pomoću računalnog programskog paketa COPERT [10]

Podaci koji su primijenjeni u ovom istraživanju odnose se na razdoblje od 2007. do 2016. godine. Ukupan broj registriranih cestovnih motornih vozila kategorije M1 u ovom se razdoblju kretao između 1,37 i 1,56 milijuna.

NAPOMENA

Pouzdana podaci o broju vozila M1, njihovoj emisijskoj strukturi (pre-Euro, Euro 1 do Euro 6) te o očitavanju putomjera, početkom izrade ove disertacije postojali su za razdoblje od 2007. do 2016. godine. Tijekom rada ti su podaci dopunjeni i 2017. godinom. Međutim, procjena emisija modelom COPERT, koji se koristi u ovome radu, zahtijeva uzimanje u obzir i količina goriva utrošenog u cestovnom transportu. Ti podaci za 2017. godinu nisu bili dostupni do trenutka završetka rada pa su emisije štetnih sastojaka analizirane samo u razdoblju od 2007. do 2016. godine. Analize su protegnute u povijest do 2005. godine, pri čemu je stanje u 2005. i 2006. rekonstruirano. To je bilo potrebno zbog toga što je 2005. referentna godina za obvezujuće smanjenje emisija stakleničkih plinova iz cestovnog transporta za 30 % do 2030., kao što je već navedeno ranije.

1.3. Očekivani znanstveni doprinos

Znanstveni se doprinos očekuje u tri aspekta:

1. Izradom modela za brzo predviđanje emisija iz cestovnog transporta omogućit će se brzo predviđanja emisija flote vozila tijekom nekoliko narednih godina, u ovisnosti o promjenama sastava flote.

2. Osnovna značajka modela bit će velika brzina izračuna rezultata, jer će njegov algoritam biti posve drugačiji od onoga primijenjenog u programu COPERT, koji se u RH primjenjuje za procjenu emisija cestovnog transporta i podnošenje izvješća nadležnim tijelima EU.
3. Rezultati istraživanja bit će izravno primjenjivi kod izrade znanstveno utemeljenih prijedloga poticajnih mjera poreznih politika vezanih uz cestovna motorna vozila.

1.4. Opis rada

Rad je podijeljen u šest poglavlja.

Prvo poglavlje sadrži kratak opis rada, ciljeve i hipotezu rada, objekt rada te očekivani znanstveni doprinos.

Drugo poglavlje sadrži pregled emisijskih standarda te pregled literature iz područja emisijskih modela. Pokazane su podjele emisijskih modela, kao i najznačajniji modeli te je dana njihova usporedba.

U trećem poglavlju provedena je dubinska analiza svih relevantnih parametara flote vozila kategorije M1 u Republici Hrvatskoj. Pokazani su rezultati izračuna emisija i emisijskih faktora modelom COPERT 5, a rezultati su uspoređeni s podacima iz drugih država.

U četvrtom poglavlju opisan je razvijeni model za upravljanje i analizu emisija iz cestovnog transporta MOCET. Provedena je validacija modela na povijesnim podacima.

Peto poglavlje sadrži scenarijsku analizu flote vozila M1. Cilj koji je razmatran jest u EU obvezujuće smanjenje emisija stakleničkih plinova iz cestovnog transporta do 2030. godine za 30 % u odnosu na 2005. godinu.

U šestom su poglavlju zaključci izvedeni na temelju rezultata istraživanja, znanstveni doprinos te preporuke za daljnji rad.

2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Početak 1990-ih u Njemačkoj je zastupano mišljenje da se emisije od cestovnog transporta u budućnosti moraju smanjiti te da će se to postići smanjenjem intenziteta cestovnog transporta⁵[11]. Međutim, dvadesetak godina nakon toga stvarnost je bila posve drugačija. U odnosu na **1990.** godinu u **2012.** ukupna potrošnja energije smanjena je za 7,7 %. Pritom je udio energije iz obnovljivih izvora porastao s 1 na 12 %, potrošnja energije iz nuklearnih elektrana smanjena je s 11 na 8 %, potrošnja energije u obliku zemnog plina i ukapljenog naftnog plina porasla je s 15 na 22 %, potrošnja energije iz ugljena smanjena je s 37 na 25 %, a udio energije iz tekućih fosilnih goriva smanjen je s 35 na 33 %. Posebno je značajna činjenica da je u istom razdoblju godišnji udio energije utrošene u cestovnom transportu porastao i relativno (sa 16 na 19 %) i apsolutno (s 2.379 PJ u 1990. na 2.571 PJ u 2012. godini) [12]. To pokazuje da je cestovni transport od izuzetne važnosti za održivost njemačkog gospodarstva te da se nasuprot ranijim prognozama njegov intenzitet povećava, a dodatne količine energije nužne za njegov rast osiguravaju se poboljšanjima procesa i preraspodjelom između ostalih sektora, uz istovremeno smanjivanje ukupne potrošnje energije.

2.1. Emisije cestovnih motornih vozila u EU – rubni uvjeti

Emisije štetnih tvari iz cestovnih vozila ograničene su u prvome redu obvezujućim smanjenjem ukupnih emisija stakleničkih plinova usvojenim Kyoto protokolom, zatim na temelju njega donesenim propisima Europske unije te naposljetku homologacijskim propisima.

Obvezujući ciljevi EU u pogledu smanjivanja emisija stakleničkih plinova su sljedeći:

1. Smanjenje ukupnih emisija stakleničkih plinova [6], [13]:
 - do 2020. godine: 20 % u usporedbi s 1990. godinom
 - do 2030. godine: 40 %
2. Smanjenje emisija u sektorima koji nisu obuhvaćeni ETS-om (*engl. Emissions Trading System*), a tu spada cestovni transport [9], [14]⁶:

⁵ Dr. Stefan Schmitz (1991), Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn.

⁶ Sektor prometa nije obuhvaćen EU sustavom trgovanja emisijama ETS (Emissions Trading System). [14]

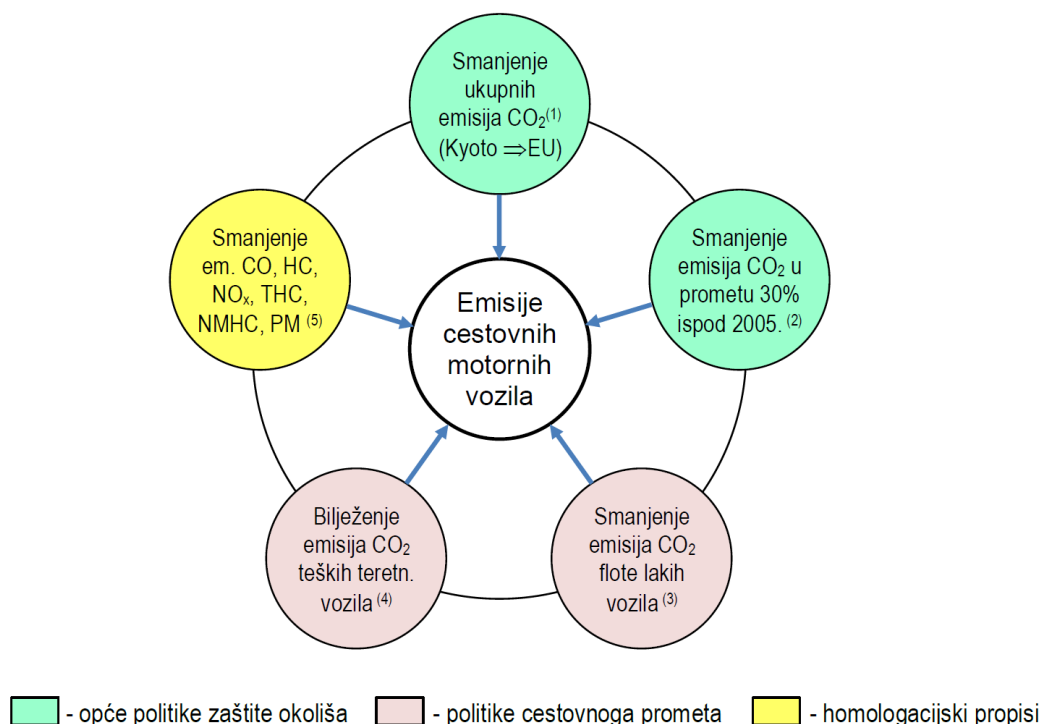
- do 2030. godine prosječno smanjenje godišnjih emisija stakleničkih plinova mora biti 30 % ispod referentne 2005. godine.
3. Potrošnja goriva flote **prodanih putničkih automobila**⁷ (M1) [15], [16]:
 - u 2020. godini 95 % flote mora imati prosječnu emisiju od 95 g CO₂/km (izmjerenu prema NEDC-u; to odgovara potrošnji od oko 4,1 L/100 km benzina ili 3,6 L/100 km dizelskoga goriva)
 - od početka 2021. svih 100 % mora imati prosječnu emisiju od 95 g CO₂/km.
 4. **Kazne:** za prekoračenje dopuštene granične emisije flote putničkih automobila (M1), počevši od 2012. godine, za *svako registrirano vozilo proizvođač* plaća [15]:
5 € za prvi g/km, 15 € za drugi g/km, 25 € za treći g/km, 95 € za svaki daljnji g/km.
Od 2019. godine kazna će iznositi 95 € za svaki gram prekoračenja počevši od prvog.⁸
 5. **Super krediti:** stimulira se proizvodnja vozila (M1) s emisijama CO₂ nižim od 50 g/km, pa se svako takvo vozilo računa prema određenoj shemi kao do 3,5 klasičnih vozila [15].
 6. Emisija CO₂ flote **prodanih lakih teretnih vozila** (N1)⁸ smije iznositi:
 - u 2017. najviše 175 g CO₂/km (NEDC)
 - u 2020. najviše 147 g CO₂/km (NEDC).
 7. Da bi zadovoljili propisane granice emisija CO₂ proizvođači vozila se smiju međusobno udruživati [15].
 8. Potrošnja goriva **teških vozila** (M2, M3, N2, N3) [17], [18].
Unatoč stalnim poboljšanjima stupnja djelovanja pogonskoga sustava, emisije CO₂ iz teških vozila porasle su između 1990. i 2007. godine za više od 30 %, uglavnom zbog povećanja cestovnog teretnog transporta, i trenutačno su oko 19 % iznad potrošnje u 1990. godini.
Nasuprot tome, emisije CO₂ iz teških vozila još se ne mjere i ne bilježe. Aktivnosti Europske komisije usmjerene prema rješavanju ovog problema uključuju:
 - Računalni program za izračun potrošnje energije VECTO (*engl. Vehicle Energy Consumption Calculation Tool*), namijenjen za procjenu emisija CO₂ iz novih kamiona najveće dopuštene mase preko 7,5 tona.
 - Prijedlog za uredbu Komisije o određivanju emisija CO₂ i potrošnje goriva novih kamiona iznad 7,5 tona, na temelju rezultata programa VECTO (tzv. certifikacijski propis).
 - Zakonodavni prijedlog za praćenje i izvještavanje tih emisija i potrošnje goriva u sklopu paketa *Europa u pokretu*⁹ (od 31. svibnja 2017.) s ciljem godišnje objave informacija o performansama novih teških vozila za tržište EU.

⁷ Mock [14] piše u naslovu „cars and vans“, icct [14] piše u naslovu „cars and light-commercial vehicles“, ali kad navode brojčane podatke (95 g/km) tada Mock piše „cars“ a icct „passenger cars“.

⁸ Dieselnet: EU: Cars: Greenhouse Gas Emissions,
<https://www.dieselnet.com/standards/eu/ghg.php> (2017-08-24).

⁹ *Europe on the Move: Commission takes action for clean, competitive and connected mobility*, 31-5-2017.
https://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/2017-05-31-europe-on-the-move_hr (2017-08-01)

Na slici 2.1. je shematski prikaz različitih modela aktivnosti čiji je glavni cilj smanjenje emisija iz cestovnih motornih vozila.



Slika 2.1. Emisije cestovnih motornih vozila – rubni uvjeti (2017-08)

Napomene uz sliku 2.1.:

⁽¹⁾ **Smanjenje emisija stakleničkih plinova** regulirano je sljedećim dokumentima:

Kyoto protokol.

- *Klimatski i energetske okvir do 2030.* [9] <http://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/> (pristup 2017-08-15);

- *Klimatski i energetske ciljevi za 2030. u pogledu konkurentnog, sigurnog i nisko ugljičnoga gospodarstva EU-a.* Priopćenje z tisak. EK, 22. siječnja 2014. [6] http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-54_hr.htm (pristup 2017-08-15);

- *Energija (ciljevi do 2050.)* [19] https://europa.eu/european-union/topics/energy_hr (pristup 2018-11-29).

⁽²⁾ **Smanjenje emisija stakleničkih plinova u cestovnom transportu** regulirano je dokumentom: *Okvir klimatske i energetske politike do 2030. Zaključci Europskog vijeća od 23. i 24. listopada 2014.* [9] <http://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/>

⁽³⁾ **Smanjenje emisija stakleničkih plinova lakih vozila** regulirano je dokumentom:

- *Reducing CO₂ emissions from passenger cars* [15].

https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_hr (pristup 2017-08-15);- *EU CO₂ emission standards for passenger cars and light-commercial vehicles, Policy update, January 2014.*

[16] www.theicct.org

- *2020–2030 CO₂ standards for new cars and light-commercial vehicles in the European Union, Briefing, November 2016.* [14] ICCT, www.theicct.org

⁽⁴⁾ **Bilježenje emisija stakleničkih plinova teških teretnih vozila i autobusa** regulirano je dokumentom:

- *Reducing CO₂ emissions from Heavy-Duty Vehicles, Policy* [17].

https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_hr (pristup 2018-08-26)

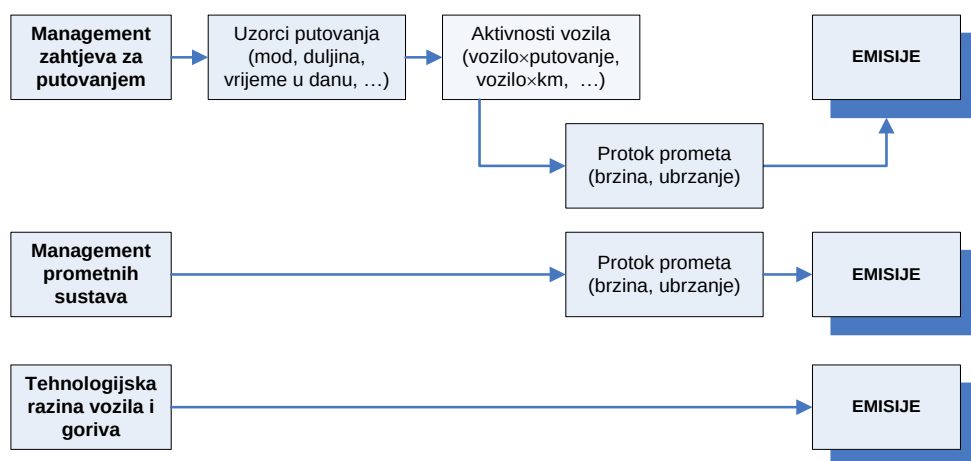
⁽⁵⁾ **Emisije štetnih sastojaka** regulirane su *Homologacijskim pravilnicima (od 2014/2016. na snazi: Euro 6)*

2.2. Modeli za procjenu emisija

U svom radu iz 1991. godine **Schmitz** [11] opisuje jedan od prvih modela za proračun emisija u Saveznoj republici Njemačkoj. Premda je potrebna računalna snaga za današnje pojmove bila veoma mala, program napisan u Fortranu 77 izvodio se na klasteru velikih računala VAX 8350. Emisije su se izračunavale načelno na isti način kao npr. u današnjem COPERT-u:

$$\text{Emisija [g]} = \text{emisijski faktor [g/km]} \times \text{prevoženi put [km]}$$

Tijekom proteklih godina razvijen je čitav niz modela u koje su ugrađeni različiti pristupi izračunu emisija štetnih tvari i emisija CO₂ iz motornih vozila. Ovi se modeli mogu razvrstati na više različitih načina, a pristupi računanju emisija pokazani su na slici 2.2.



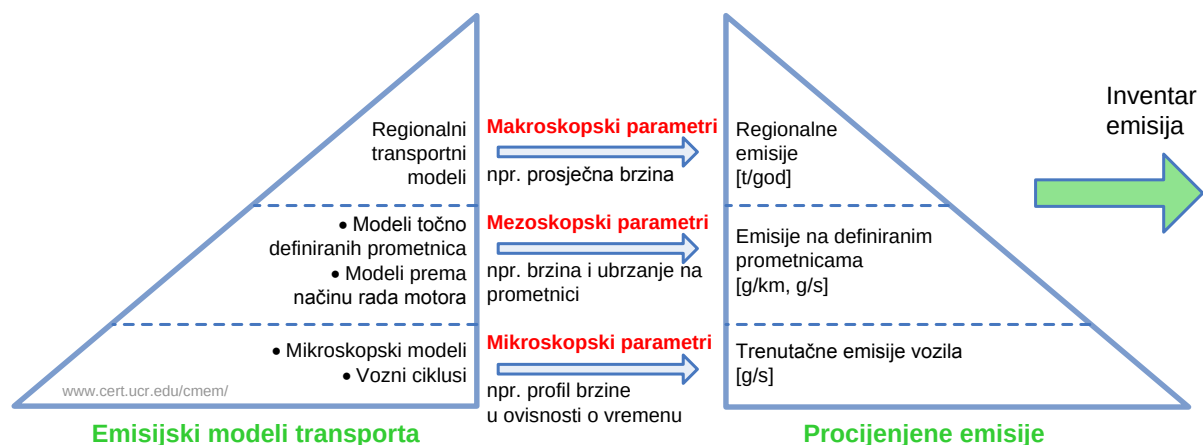
Slika 2.2. Različiti pristupi računanju emisija u modelima za procjenu emisija cestovnog transporta [20]

Elkafoury et al. (2014.) [23] razvrstali su modele (slika 4.7) za procjenu emisija cestovnog transporta prema razini detalja obuhvaćenih ulaznim parametrima koji se zadaju izvana. Statički modeli (*top-down*) uzimaju u obzir skupne ulazne parametre kao što su prosječna brzina promatrane skupine vozila i njihov prosječan emisijski faktor, dok dinamički modeli (*bottom-up*) uključuju više mikroskopskih varijabli kao što su prometna situacija ili trenutačne brzine vozila.

Yue (2008.) [21] je predložio podjelu modela prema opsegu ulaznih varijabla u tri kategorije (slika 2.3.): na mikroskopske, mezoskopske i makroskopske modele.

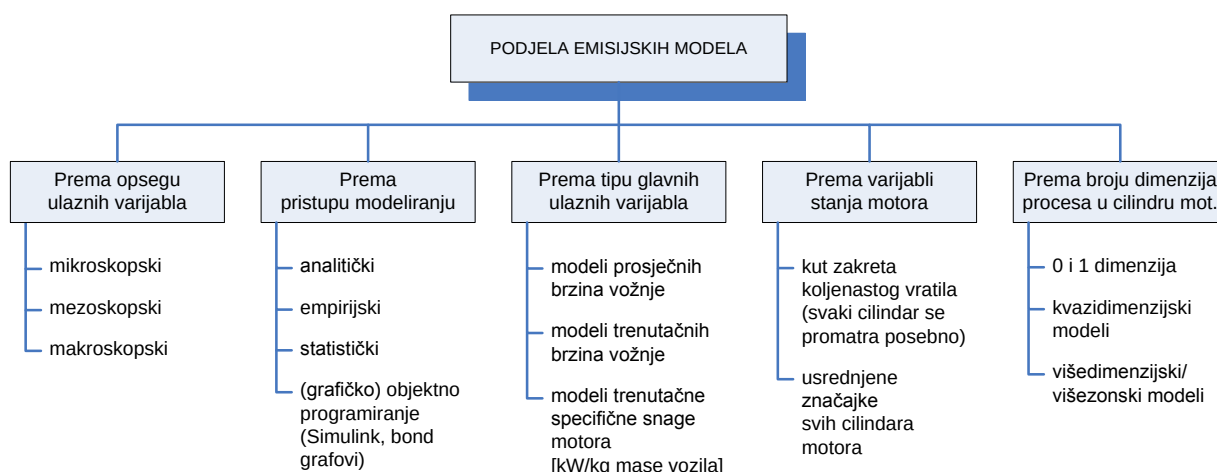
- Mikroskopski modeli uzimaju u obzir trenutačnu brzinu i ubrzanje vozila te pomoću njih procjenjuju trenutačnu potrošnju goriva i emisije
- Makroskopski modeli koriste skupne parametre transportne mreže i procjenjuju potrošnju goriva i emisije širom mreže
- Mezoskopski modeli se nalaze između mikroskopskih i makroskopskih

Sve ove tri podkategorije mogu se nazvati *modalnim modelima* budući da procjenjuju emisije na temelju različitih načina (*modova*) rada motora i vozila (npr. zagrijavanje motora, profil brzine u ovisnosti o vremenu itd.).



Slika 2.3. Prikaz podjele modela cestovnog transporta prema opsegu ulaznih varijabla [22]

Faris et al. (2011.) [24] su u sveobuhvatnom, dubinskom pregledu svih tada dostupnih emisijskih modela objasnili prepoznavanje trenutnog stanja u modeliranju potrošnje goriva i emisija vozila. Predložili su podjelu modela u pet kategorija s ukupno petnaest podkategorija (slika 2.4.). Pokazani su glavni modeli za svaku od ovih klasifikacija te su zatim uspoređeni s obzirom na pretpostavke, ograničenja, prednosti i nedostatke, karakteristične parametre, tehnike prikupljanja podataka, točnost i važnost za cestovni transport. Istraživanje je pokazalo da ovi, svi tada dostupni, modeli dobro pokazuju trendove potrošnje goriva vozila i emisija u usporedbi s trendovima terenskih ispitivanja. Također je pokazano da mezokopski modeli, empirijski modeli, modeli bazirani na srednjim vrijednostima i kvazidimenzijski modeli predstavljaju dobar kompromis između jednostavnosti samog modela i točnosti izračunatih rezultata te su stoga vrlo pogodni za primjenu u transportu. Studija pokazuje i da još uvijek nijedan model ne zadovoljava sve potrebe transporta.



Slika 2.4. Podjela modela cestovnog transporta [24]

Smit et al. (2010.) [25] proveli su metaanalizu 50 radova koji se bave validacijom svih najznačajnijih modela za procjenu emisija cestovnog transporta. U tu svrhu modele su podijelili u pet skupina s postepenim povećanjem složenosti s obzirom na razinu detalja i utjecaj pojedinih čimbenika:

1. *Modeli prosječne brzine* (npr. COPERT, MOBILE, EMFAC), kod kojih su emisijski faktori ($\text{g}/(\text{vozilo} \times \text{km})$) funkcija prosječnih brzina vožnje. Ulazne informacije o VKT (*engl. Vehicle Kilometres Travelled*) i prosječnoj brzini relativno je lako izračunati iz transportnih modela ili terenskih mjerenja.
2. *Modeli prometnih situacija* (npr. HBEFA, ARTEMIS), gdje su emisijski faktori ($\text{g}/(\text{vozilo} \times \text{km})$) određeni opisom pojedinih prometnih situacija (npr. „vožnja stop-and-go“, „slobodan protok autocestom“). Modeli prometnih situacija kao ulazne podatke zahtijevaju VKT podatke po pojedinim situacijama vožnje, a oni se mogu izračunati iz transportnih modela.
3. *Promjenjivi transportni modeli* (npr. TEE, Matzoros model), gdje su emisijski faktori ($\text{g}/(\text{vozilo} \times \text{km})$) definirani varijablama protoka transporta kao što su prosječna brzina, gustoća transporta, duljina reda vozila i postavke signala, od kojih se većina može odrediti iz makroskopskih i mikroskopskih transportnih modela.
4. *Modeli promjenjivih ciklusa* (npr. MEASURE, VERSIT+), u kojima su emisijski faktori ($\text{g}/(\text{vozilo} \times \text{km})$) funkcije različitih varijabli vožnje (npr. vrijeme mirovanja vozila s uključenim motorom, prosječna brzina, pozitivna kinetička energija) pri visokoj razlučivosti (od nekoliko sekundi do minuta). Ti modeli obično zahtijevaju detaljne informacije o kretanju vozila (npr. trenutačne podatke o brzini, ubrzanju i gradijentu nagiba ceste) koji se mogu odrediti samo iz mikroskopskih modela transporta ili primjerice pomoću GPS opreme.
5. *Modalni modeli* (npr. PHEM, CMEM), pri čemu su faktori emisije (g/s ili g/mod) određeni preko modela rada motora ili vozila pri najvećoj razlučivosti (od jedne do nekoliko sekundi). Oni zahtijevaju slične ulazne podatke kao modeli promjenjivih ciklusa.

Validacija je provedena primjenom šest različitih metoda koje se mogu koristiti u različitim prostornim obuhvatima.

1. *Laboratorijska validacija* nalazi svoju opravdanost u činjenici da su emisijski faktori većine modela razvijeni ispitivanjima vozila u laboratorijima. Prednosti ovakve validacije su strogo kontrolirani uvjeti ispitivanja i velika vremenska i prostorna razlučivost ($\text{g}/(\text{vozilo} \times \text{km})$, g/km , g/mod), kontrola važnih parametara (npr. toplog/hladnog starta, natovarenosti vozila, korištenja klimauređaja, temperature okoline). Nedostaci se pak ogledaju u tome što se ovom metodom može ispitati samo ograničen broj vozila, prometnih ciklusa i situacija zbog visokih troškova, a za validaciju je potreban velik broj ispitivanja da bi se oslikala varijabilnost emisija u stvarnom svijetu.
2. *Validacija u stvarnim uvjetima vožnje*. Mjerenja na vozilu alternativa su laboratorijskim mjerenjima i mogu se primijeniti za validaciju na putnoj razini u stvarnim uvjetima vožnje. Pritom se emisijski faktori ($\text{g}/(\text{vozilo} \times \text{km})$) uspoređuju s

ukupnim emisijama, mjerenim s on-board uređajima, duž odgovarajuće udaljenosti, na jednom ili više vozila. Metoda pruža razumnu kontrolu nad utjecajnim parametrima (hladni start, natovarenost vozila). Međutim, testiranje velikog uzorka vozila još uvijek je ograničeno vremenom i troškovima, osobito za starija vozila koja zahtijevaju više vremena za pripremu, jer se relevantni operativni podaci ne mogu lako izvući iz sustava upravljanja motorom.

3. *Tunelska validacija*. Tunelska mjerenja korištena su za validiranje modela cestovnih sekcija. Ovom metodom određuju se emisijski faktori pomoću razlika u koncentracijama onečišćujućih tvari na ulazu i izlazu tunela, u kombinaciji sa značajkama tunela (npr. duljina ceste, poprečni presjek tunela) te značajkama transporta i uvjeta transporta, kao i izmjerenim protokom zraka kroz tunel ili faktorom razrjeđivanja mjenenoga plina. Tunelskim mjerenjima mjere se emisije velikog uzorka cestovne flote, čime se adekvatno obuhvaća varijabilnost među emisijama vozila, a mjerenja se provode pod relativno kontroliranim uvjetima. Na primjer, uvjeti razrjeđivanja zraka bolje su poznati u tunelima nego u pokusima na otvorenom putu, a utjecaj meteoroloških parametara je praktično zanemariv. Isto tako je disperzija onečišćujućih tvari ograničena geometrijom tunela. S druge strane, metoda tunela oslanja se na neizravnu procjenu, a ne na izravno mjerenje ispušnih plinova, što može dovesti do pogrešaka. Nadalje, raspon radnih uvjeta je ograničen (obično jednakomjerna vožnja relativno prorijeđenih vozila velikom brzinom) i može izazvati klizanje rezultata uslijed uzlaznog ili silaznog gradijenta ceste. Konačno, takozvani 'učinak klipa' (koji se javlja kod jednosmjernog protoka transporta) i prisilna ventilacija u smjeru protoka transporta mogu se zbrojiti stvarajući efekt vjetrodostraga koji smanjuje aerodinamički otpor vozila na tunelu. Taj učinak može smanjiti emisije i za 45 %.[25]

4. *Validacija mjerenjem na daljinu (engl. remote sensing validation)*. IR ili UV zraka usmjerena preko ceste mjeri trenutačne omjere različitih onečišćujućih tvari. Te se informacije tada koriste za izračunavanje srednjih emisijskih faktora ($\text{g}/(\text{vozilo} \times \text{km})$, g/kg goriva) koji se uspoređuju s emisijskim faktorima modela. Daljinsko očitavanje omogućuje izravno mjerenje emisija iz velikih uzoraka vozila, što je neosporna prednost, ali postoji niz problema s obzirom na njegovu primjenu na validaciju modela.

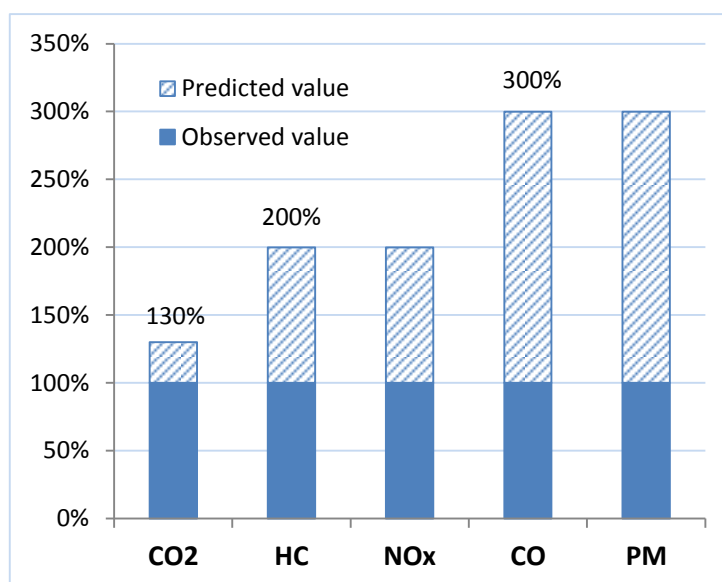
Npr. omjer onečišćujuće tvari i CO_2 pretvara se u emisijski faktor na bazi goriva (g/kg goriva) uz pretpostavku nerazrijeđene koncentracije CO_2 u ispušnim plinovima. I nerazrijeđena koncentracija CO_2 i potrošnja goriva uglavnom su nepoznate za vozila koja prolaze. Štoviše, daljinsko ispitivanje koristi drugačije principe mjerenja od standardne laboratorijske opreme. Umjesto mjerenja NO_x , daljinska mjerenja mjere samo NO , što znači da treba pretpostaviti omjer prema $\text{NO}_2:\text{NO}$ (ovaj se omjer posljednjih nekoliko godina povećava) za procjenu ukupnog NO_x . Zbog toga je upotreba podataka daljinskih senzora za provjeru valjanosti upotrebljiva samo za modele koji predviđaju emisije pri visokoj razlučivosti (g/s , g/mod).

5. *Validacija mjerenjem koncentracija u okolišu*. Ova metoda ili izravno uspoređuje mjerene koncentracije onečišćujućih tvari u okolišu s rezultatima kombiniranog

emisijskog i disperzijskog modeliranja (uključujući pozadinske koncentracije) ili izračunava emisijske faktore inverzijskim modeliranjem disperzije uzimajući u obzir lokalne uvjete transporta. Metoda obuhvaća niz uvjeta vožnje i veliki uzorak vozila, što su prednosti za validaciju modela. Međutim, problem je kako uskladiti upotrebu modela emisije i modela disperzije, kao i pojednostavljenja okoliša (savršeno miješanje ili stabilni uvjeti vjetra). Budući da je ovo neizravno mjerenje, podložno je pogreškama zbog upotrebe drugih modela (disperzija) i procjene izvora koji nisu transportni. Rezultati ovakvih studija pružaju informacije samo za jednu ili nekoliko određenih lokacija transportne mreže (npr. za priključak bočne ceste ili za dionicu između dva raskrižja).

6. *Validacija metodom balance mase okoliša.* Ispitivanjima masene ravnoteže određuju se protoci onečišćujućih tvari (kg/h) mjerenjem njihovih koncentracija uz vjetar i niz vjetar u određenim područjima na različitim visinama, primjerice pomoću zrakoplova ili jarbola, te usporedbom tih podataka s predviđenim emisijama u velikom prostornom području izračunatima razmatranim modelom. Problemi ove metode slični su onima kod mjerenja koncentracija u okolišu.

Provedena analiza pokazala je da ne postoje uvjerljivi dokazi koji bi upućivali na to da složeniji modeli sustavno rezultiraju manjim pogreškama u predviđanjima od manje složenih modela. Pogreške predviđanja općenito su bile unutar faktora 1,3 od promatranih vrijednosti za CO₂, faktora 2 za HC i NO_x i unutar faktora 3 za CO i PM, kako je prikazano na slici 2.5.. Na kraju autori preporučuju, između ostaloga, upotrebu modela koji uključuju sposobnost kvantificiranja pogrešaka, kao i međusobne usporedbe rezultata raznih modela te da se novi pokušaji provjere valjanosti usmjeravaju na modele koji se najčešće koriste u praksi.



Slika 2.5. Usporedba rezultata procjena emisijskim modelima i rezultata mjerenja [25]

Barth et al. (1996) [26] i **An et al. (1997)** [27] razvili su modalni model emisije, nazvan CMEM, koji se temelji na jednostavnom parametriziranom empirijskom pristupu i sastoji se od šest modula koji procjenjuju snagu i brzinu vrtnje motora, omjer zraka i goriva, potrošnju goriva, emisije ispušnih plinova i pretvorbu u katalizatoru. Ovaj model, koji se i danas

primjenjuje [22], te se još uvijek smatra jednim od najboljih mikroskopskih modela [24], izrađen je na osnovi ispitivanja na valjcima sa simulaciju opterećenja provedenih na 300 vozila uzetih iz stvarne uporabe. Kao ulazne varijable koriste se tri dinamičke varijable (ubrzanje, omjer goriva i zraka i potrošnja goriva), sekundna brzina vožnje, nagib ceste i upotreba dodatne opreme (kao što je klima uređaj). Izlazni rezultat je trenutačna emisija na izlazu ispušne cijevi modelirana pomoću tri komponente: potrošnje goriva, mase emitiranih tvari po gramu potrošenog goriva i pretvorbe u katalizatoru.

Wang et al. (2008.) [28] istraživao je utjecaj uzoraka vožnje na potrošnju goriva pomoću prijenosnog sustava za mjerenje emisija na deset osobnih automobila. Pokazalo se da je potrošnja goriva vozila po jedinici udaljenosti optimalna pri brzinama između 50 i 70 km/h, a da značajno raste s ubrzanjem. Razvijen je model temeljen na „trenutačnoj specifičnoj snazi“ (kW/t mase vozila) za izračunavanje potrošnje goriva koji daje dobre rezultate u usporedbi s izmjerenim podacima.

De Haan et al. (2000.) [29] u radu raspravljaju o primjeni "trenutačnih" podataka za procjenu emisija putničkih automobila tijekom vožnje u stvarnom vremenu, prikupljenih visokom rezolucijom (1 Hz). Opsežna mjerenja provedena na 20 automobila Euro 1 s Ottovim motorom korištena su za predviđanje emisijskih faktora za standardne vozne cikluse i za vožnju u stvarnim uvjetima. Pokazano je da su vrijednosti emisija određene ispitivanjima na valjcima za simulaciju opterećenja, uz standardne vozne cikluse, znatno manje od emisija tijekom vožnje u stvarnim uvjetima. Vozila opremljena katalizatorom trostrukog djelovanja imaju niske osnovne emisije, ali i česte kratkotrajne vršne vrijednosti (pikove). Njihova učestalost ovisi o različitim čimbenicima voznog ciklusa, uključujući brzinu vožnje i ubrzanje. Zbog toga primjena prosječne brzine kao jedinog parametra nije dovoljna za karakteriziranje emisija određenog voznog ciklusa. Trenutačni pristup emisijama koristi dodatni parametar koji predstavlja opterećenje motora, kako bi se ublažile razlike između voznih ciklusa s usporedivim prosječnim brzinama vožnje ali različitim razinama "dinamike". Rad obuhvaća istraživanje različitih statističkih pokazatelja i raspravu o metodama za daljnje poboljšanje sposobnosti predviđanja ovog trenutačnog pristupa emisijama. Poteškoću predstavljaju razlike u strategijama smanjenja emisija između različitih proizvođača automobila, što gotovo onemogućuje stvaranje modela valjanog za sve katalizatore kao što je to potrebno kod modela namijenjenog predviđanju razina emisija i emisijskih faktora na razini flote vozila temeljem kratkotrajnih voznih ciklusa.

Weilenmann et al. (2013.) [30]. Vruće emisije (vozila zagrijanog na pogonsku temperaturu), u kojima sustavi za pročišćavanje ispušnih plinova ispravno rade, s napretkom tehnike se i dalje smanjuju. Zbog toga se unazad nekoliko godina u ukupne emisije ubrajaju i emisije u fazi zagrijavanja hladnog motora (engl. *cold emissions*). U emisijskim modelima se pored statističkog unosa aktivnosti flote primjenjuju odvojeni podmodeli za vožnju zagrijanog vozila kao i za hladni start. Modeli hladnog starta gotovo su potpuno empirijski i ograničene točnosti. Autori su u radu pokazali razvoj modela temeljenog na bilancama energije i tvari. Budući da mnoge pojedinosti ipak ostaju nepoznate, kao što su npr. toplinska vodljivost i odluke o upravljanju motorom, model mora biti u mogućnosti provesti razna

pojednostavljenja. Model se može parametrizirati za što su dovoljna samo dva testa po vozilu. Primijenjen na nekoliko uzoraka vozila (od šest do osam vozila) različitih tehničkih generacija, model je pokazao pouzdana predviđanja za bilo koji ciklus vožnje (uključujući nagib ceste), temperaturu okoline, vrijeme stajanja prije vožnje i trajanje vožnje (ako je bila kraća od faze zagrijavanja).

Palmgren et al. (1999.) [31] razvili su metodu određivanja emisija stvarne flote vozila u realnim uvjetima vožnje. Metoda se temelji na mjerenjima kakvoće zraka, brojanju transporta i inverznoj primjeni modela kakvoće uličnoga zraka. Među onečišćujućim tvarima su od posebne važnosti hlapivi organski spojevi VOC (*engl. Volatile Organic Compounds*) zbog štetnih utjecaja na zdravlje. Zbog toga se u središtu Kopenhagena od 1994. provode mjerenja benzena, toluena i ksilena. Značajna korelacija je zabilježena između VOC-a i koncentracija CO, što ukazuje da su Ottovi motori glavni izvori onečišćenja zraka VOC-om u središnjem Kopenhagenu. Satna srednja koncentracija benzena dostiže kritične vrijednosti, prema preporukama WHO-a (*engl. World Health Organization*). Na temelju inverznog modela proračuna disperzije onečišćujućih tvari u uličnim kanjonima procijenjeno je da je prosječan emisijski faktor benzena za flotu s Ottovim motorom od 1994. do 1997. opao za gotovo tri četvrtine.

Franco et al. (2013.) [32] i **Fontaras et al. (2014.)** [33] su istraživali emisijske faktore (EF) koji predstavljaju empirijske funkcionalne odnose između emisija onečišćujućih tvari i aktivnosti koja ih uzrokuje. Pokazane su glavne prednosti i nedostaci svake od metoda. Također je dan pregled metoda za izvođenje EF-a iz rezultata ispitivanja, s jasnom distinkcijom između strogo kontroliranih laboratorijskih uvjeta i mjerenja u uvjetima stvarnog transporta. Ispitivanjem trinaest Euro 5 putničkih automobila na valjcima za simulaciju opterećenja, prema voznim ciklusima NEDC (*engl. New European Driving Cycle*), WLTC (*engl. Worldwide Harmonized Light-duty driving Test Cycle*) i CADC (*engl. Common ARTEMIS Driving Cycle*), izmjereni su emisijski faktori za CO₂, NO_x, HC, CO i PM. Ovako ustanovljene vrijednosti uspoređene su s emisijskim faktorima referentnih europskih modela za procjenu emisija cestovnog transporta COPERT i HBEFA i s homologacijskim granicama. Izmjerene emisije ostale su ispod dopuštenih granica kod primjene ciklusa NEDC. U dinamičnijim ciklusima WMTC (*engl. World Motorcycle Test Cycle*) i CADC, koji znatno vjernije oslikavaju vožnju u stvarnom svijetu, emisije su bile veće, ali su u većini slučajeva ostale ispod homologacijskih granica. Međutim, izmjereni emisijski faktori za NO_x kod vozila sa Dieselovim motorom u ciklusima WMTC i CADC premašili dopuštene granice, u ekstremnim slučajevima i do 5 puta. Usporedba s referentnim modelima pokazala je dobru korelaciju u svim slučajevima, što je ohrabrujuće s obzirom na važnost ovih alata u praćenju emisija i procesu donošenja odluka.

Da bi se poboljšala točnost, pouzdanost i reprezentativnost emisijskih faktora, 10 europskih laboratorija radilo je zajedno na proučavanju utjecaja 20 parametara na mjerenje tih faktora kod ispitivanja lakih vozila na valjcima za simulaciju opterećenja [34]. Parametri su bili podijeljeni u 4 glavne kategorije: vozne cikluse, parametre vožnje, uzorkovanje vozila i parametre laboratorija. Rezultati u radu temelje se na (1) sintezi literature, (2) na oko 2700 specifičnih testova provedenih na 183 vozila i (3) na ponovnim izračunima rezultata više od

900 testova. Pokazalo se da točnost modeliranja onečišćenja zraka i učinkovitost snižavanja propisanih graničnih emisija ovise o točnosti mjerenja emisijskih faktora. Razumijevanje uloge različitih emisijskih parametara omogućuje poboljšanje standardne metode mjerenja emisija i kvalitete izračuna emisija na lokalnoj, regionalnoj ili nacionalnoj razini.

Zamboni et al. (2011.) [35] proveli su eksperimentalno istraživanje s trenutačnim mjerenjima brzine motocikala opremljenih mjernom opremom, na tri tipične gradske relacije podijeljene u dvanaest sekcija prema različitim cestovnim razredima. Prikazani su glavni kinematički parametri određeni obradom eksperimentalnih vrijednosti i uspoređeni s onima koji se odnose na standardne cikluse, potvrđujući da se stvarni uvjeti vožnje teško mogu reproducirati zakonom propisanim ciklusima.

Nakon toga je analizirano nekoliko serija izmjerenih podataka. Emisije ispušnih plinova i faktori potrošnje goriva izračunati su za različite klase motocikla pomoću emisijskih funkcija izvedenih iz modela Copert, Artemis i Progress, za tipične i za eksperimentalne prosječne brzine vožnje. Rezultati su zatim uspoređeni kako bi se istaknule razlike među primijenjenim funkcijama i metodologijama.

Izvršen je izbor brzinskih profila kako bi se definiralo emisijsko ponašanje motocikala kod ispitivanja na valjcima za simulaciju opterećenja i to eksperimentalni emisijski faktori i faktori potrošnje goriva za skuter Euro 3. Također su mjerene hladne i vruće ispušne emisije i potrošnja goriva mopeda Euro 2. Zadovoljavajuća usporedba s rezultatima ispitivanja prema standardnim i realnim voznim ciklusima pokazuje da novi dijagrami brzine mogu biti korisni za definiranje emisija i potrošnje goriva ovih vozila.

Zhang et al. (2012.) [36] istraživali su postojeće metodologije i praksu u razvoju voznih ciklusa za procjenu emisija. Temeljem literaturnih izvora identificirana su četiri tipična koraka razvoja ciklusa: prikupljanje podataka, generiranje mikrorute, odabir metode procjene emisija te razvoj samog ciklusa.

Ericsson (2001.) [37] je usmjerila svoja istraživanja na pronalaženje nezavisnih mjera za opisivanje dimenzija urbanih uzoraka vožnje i ispitivanje koja svojstva imaju glavni utjecaj na emisije i uporabu goriva. Regresijskom analizom odnosa između faktora uzorka vožnje i korištenja goriva te emisijskih faktora, pokazano je da devet faktora uzorka vožnje ima znatne učinke na okoliš. Četiri od njih su povezana s različitim aspektima potrebe za snagom i ubrzanjem, tri opisuju promjene stupnjeva mjenjača a dva opisuju učinak određenih brzinskih intervala.

Hilty (1997.) [38] je istraživao modeliranje transporta usmjereno prema očuvanju okoliša primjenjujući širok raspon modela čiji se rezultati mogu sustavno uspoređivati. Upravljanje modelima bilo je podržano objektno orijentiranim sustavom baze podataka. Na konkretnom primjeru pokazano je da primjena različitih modela može dovesti do istih zaključaka, tako da nedostatak jednoznačnosti na strani modela ne dovodi nužno do neizvjesnih odluka.

Lei Yu et al. (2009.) [39] u svom su radu obuhvatili široki spektar utjecajnih čimbenika kakvoće zraka. Uzimajući u obzir negativne učinke emisija cestovnog transporta na društveno i gospodarsko okruženje, istraživači su pokušali pronaći rješenja za smanjenje

emisija sintetizirajući rezultate analiza različitih relevantnih studija. Međutim, zbog raznolikosti tema, većina studija usmjerena je samo na specifična, sužena područja. Svrha ovog rada je da ispuni ovu prazninu. Dan je pregled postojećih istraživanja i razvoja, u svakoj od tema vezanih uz emisije, nakon čega slijede prikazi odgovarajućih rezultata i analize.

Parrish (2006.) [40] je u radu istraživao procjene emisija cestovnih vozila za američku agenciju za zaštitu okoliša, uspoređujući ih s mjerenjima okoliša i inventarom emisija na bazi goriva. Identificirano je nekoliko značajnih slabosti i prednosti: (1) Procjene emisija znatno su se mijenjale tijekom proteklih 15 godina i nisu jasno povezane s progresivno točnijim i određenim rezultatima. (2) Najnovije procjene emisija dobro prate brzo smanjenje emisija ugljikovog monoksida (CO) i hlapivih organskih spojeva (VOC), ali nadmašuju veličinu emisija CO za oko dva puta. (3) Procjene emisija oksida dušika (NO_x) od sredine do kraja 1990-ih su razumno točne, no emisije NO_x su porasle tijekom tog desetljeća, a nisu opale kako je navedeno u procjeni emisija. (4) Najnovije procjene emisija točnije razgraničavaju emisije NO_x vozila pogonjenih dizelskim gorivom i benzinom nego što je to bio slučaj ranije. (5) Omjer dvaju specifičnih VOC spojeva, karakterističan pri mjerenjima okoline, upućuje na to da je procjena pojedinih VOC-a pogrešna za 3 do 4 puta. Pokazano je da dojam o emisijama američkih vozila u međunarodnoj javnosti poprilično loš, odnosno da postoji sumnja u točnost i dosljednost.

Heywood (2010.) [41] u radu opisuje metodologiju za stvaranje vjerojatnih scenarija budućih oblika transporta i procjenu njihovih utjecaja, s obzirom na postavljene ciljeve u smanjenju emisija stakleničkih plinova od cestovnog transporta, posebno lakih vozila (putničkih automobila i laganih teretnih vozila). Čimbenici koji moraju biti uključeni su: učinkoviti pogonski sustavi, promjene mase vozila, performanse, veličina i drugi atributi vozila, i sve to mora biti veoma brzo. Naime, može se očekivati da će implementacija ovih poboljšanih tehnologija protekom vremena biti sve veća. Pokazana metodologija kombinira inženjerske procjene performansi vozila za različite tehnologije pogona i vozila, model flote registriranih vozila i dostupnost različitih goriva. Rezultati pokazuju da postoji značajan potencijal za smanjenje potrošnje nafte i emisija stakleničkih plinova kroz poboljšanja motora, mjenjača, smanjenja mase vozila i primjenu alternativnih goriva.

Mock (2010.) [42] je tijekom izrade svoje disertacije izradio kompleksan računalni model za proračun scenarija za razvoj budućeg tržišta cestovnih vozila u Njemačkoj za razdoblje od 2009. do 2030. godine. Model uzima u obzir veliki broj utjecajnih faktora, s težištem na udjele novih tehnologija i izvora energije na tržište vozila i njihov utjecaj na emisije CO₂. Model je validiran usporedbom rezultata simulacija s podacima u proteklom razdoblju. Nasuprot mjerama za postizanje ciljanih emisija CO₂ na razini flote, utjecaj cijena nafte na svjetskom tržištu na ove rezultate bio je relativno malen.

Leinert et al. (2013.) [43] istražuju utjecaj posebnog poreza na motorna vozila na emisije onečišćivača zraka u Irskoj. U razdoblju od 2000. do 2008. godine ukupne emisije CO₂ narasle su za 34 %. Vlada je poreznom politikom potaknula kupovinu vozila koja emitiraju manje CO₂ i tržište se okrenulo vozilima s Diesellovim motorima. Međutim, kako to utječe na emisije NO_x? Ovaj rad kombinira dva modela za rješavanje ovog pitanja, modela flote vozila za

generiranje podataka o aktivnostima (budući sastav i aktivnosti irske flote automobila) i model COPERT kako bi se kvantificirale emisije NO_x nastale u razdoblju od 2008. do 2020. godine. Očekuje se da će zbog politike oporezivanja doći do smanjenja emisija CO₂ iz putničkih automobila od 7 % u 2020. godini, u usporedbi s osnovnim scenarijem prije oporezivanja. Rezultati također pokazuju da se emisije NO_x smanjuju u svim scenarijima, ali je ostvaren manji stupanj smanjenja emisija NO_x zbog povećanja udjela vozila s Diesellovim motorima.

Fontes et al. (2014.) [44] u svom su radu ispitali utjecaj promjena sastava flote na emisiju zbog uvođenja različitih politika cestovnog prijevoza u srednje velikoj europskoj zemlji (Portugal) primjenom tzv. ex-post analize (npr. politike temeljene na određivanju cijena goriva, uklanjanju automobila, oporezivanju automobila): usporedba osnovnog scenarija sa suprotnim scenarijem kako bi se razumjelo što bi se moglo dogoditi u nedostatku uvođenja tih politika. Za svaki su scenarij procijenjena četiri pristupa uz primjenu ekonomskih učinaka i/ili troškova ljudskog zdravlja. Procjenjivane su emisije HC, CO, NO_x, PM i CO₂ iz putničkih automobila i lakih teretnih vozila. Rezultati pokazuju visoku korelaciju ($p \leq 0,05$) između emisija CO i različitih značajki kao što su starost vozila, vrsta goriva i klasa motora. Isti odnos zabilježen je između prosječne dobi vozila i emisija HC, NO_x i PM. Nakon primjene politike cestovnog transporta, prosječni emisijski faktori flote smanjili su se 28 - 62 % za HC, CO, NO_x, PM i 20 - 39 % za CO₂. Međutim, ako bi se primijenio suprotan scenarij, smanjenje bi bilo 20 - 80 %, odnosno 26 - 55 %. Rezultati pokazuju da, iako su zabilježene neke koristi, raspodjela karakteristika flote bila je 2001. godine ekološki prihvatljivija nego u 2011. godini.

Meyer et al. (2012.) [45] su razmatrali transport putničkih automobila kao jedan od najvećih izvora antropogenih emisija stakleničkih plinova. On se također primjenjuje kao važan pokazatelj za predviđanje tih emisija u integriranim klimatskim i gospodarskim modelima. Ovaj rad razvija scenarije za cjelokupnu svjetsku flotu putničkih automobila do 2050. godine. Studija donosi globalni regionalizirani pristup koji obuhvaća 11 svjetskih regija. Projekcije flota automobila određuju se pomoću multimodalnog pristupa, koji uključuje model potrošačke potražnje koji se temelji na maksimiziranju korisnosti, nelinearnom Gompertzovom¹⁰ modelu i procjeni elastičnosti prihoda s obzirom na potražnju za automobilima. Glavna pretpostavka koja proizlazi iz ovih projekcija je da su pretpostavke za kupnju automobila slične u svim kulturama i narodima te da potražnju za automobilima u velikoj mjeri određuje raspoloživi dohodak.

Palencia et al. (2012.) [46] razmatraju implikacije uvođenja vozila s nultim emisijama – ZEV (*engl. Zero Emissions Vehicles*) i laganih materijala u konvencionalnu flotu motornih vozila od pretežno čeličnih materijala, s motorima s unutarnjim izgaranjem, postavljajući pitanje kako to utječe na potrošnju energije i na zahtjeve za tim novim materijalima. Autori su razvili dinamički računalni model (*bottom-up*) fleksibilne flote vozila, uključujući proizvodnju i zbrinjavanje vozila, s detaljnom pokrivenošću pogonskim agregatima i automobilskim

¹⁰ Gompertzova krivulja ili Gompertzova funkcija, vrsta je matematičkog modela vremenskoga niza i nazvana je po Benjaminu Gompertzu (1779.-1865.). To je funkcija koja opisuje rast koji je najsporiji na početku i na kraju određenog vremenskog razdoblja.

materijalima. Model je korišten za proučavanje potencijala potrošnje energije i smanjenje emisija CO₂ ZEV-a i potencijala laganih materijala u kolumbijskom voznom parku putničkih automobila od 2010. do 2050. godine. Rezultati pokazuju da će se flota osobnih vozila u Kolumbiji povećati 6,6 puta u razdoblju od 2010. do 2050. godine. Prema osnovnom scenariju potrošnja energije i emisije CO₂ povećavaju se 5,5 odnosno 4,9 puta. Lagana i baterijska vozila obećavaju najveće smanjenje potrošnje energije (48 %) *od-spremnika-do-kotača (tank-to-wheel)* i najveće smanjenje emisija CO₂ (61 %) u odnosu na referentnu 2010. godinu. Spora obnova i sporo povećanje flote zapreka su većim smanjenjima. Prijelaz na električne pogonske sustave ima veći utjecaj na smanjenje potrošnje energije i emisija CO₂ od primjene laganih materijala. Željezo i čelik i dalje će biti glavni materijali u novim automobilima. Potrošnja aluminija raste u svim scenarijima, dok se polimeri ojačani ugljičnim vlaknima primjenjuju samo u vozilima s gorivnim člancima, hibridnim električnim vozilima i naročito laganim vozilima.

Duarte et al. (2014.) [47] u svom su radu prikazali metodologiju za procjenu potrošnje goriva i emisije NO_x u vozilima, primjenjujući samo javno objavljene podatke o homologaciji pojedinih tipova vozila. Upotrebom prikupljenih podataka za 14 vozila, prikupljenih u uvjetima stvarne vožnje na cesti, bilo je moguće utvrditi trendove korištenja goriva i emisija u skladu s potrebnom energijom, koristeći metodologiju specifične snage (kW/t vozila) koja je primijenjena za procjenu potrošnje goriva i emisije NO_x na vozilima sa Diesellovim motorom. U usporedbi s upotrebom vozila u stvarnome svijetu, procijenjena potrošnja goriva pokazala je prosječno apsolutno odstupanje manje od 10 %. Što se tiče procjena NO_x, prosječno apsolutno odstupanje iznosi oko 22 %. Ovom metodom moguće je procijeniti pojedinačno vozilo, korištenjem javnih podataka, bez mjerenja na cesti i bez uspostavljanja veza između homologacije i vožnje vozila u stvarnim uvjetima.

Ntziachristos et al. (2014.) [48] su iz raznih europskih izvora prikupili i analizirali podatke o potrošnji goriva od 924 putnička automobila (611 sa Ottovim i 313 Diesellovim motorom) te ih usporedili s njihovim homologacijskim vrijednostima. Analiza je pokazala da je prosječna potrošnja goriva bila veća od homologirane, 11 % kod automobila sa Ottovim i 16 % kod automobila sa Diesellovim motorom. Usporedba s nizozemskom bazom podataka Travelcard pokazala je da se odstupanje povećalo za modele novijih godišta i to posebno kod automobila s niskim homologiranim vrijednostima. Odstupanja su bila veća od 60 % za vozila registrirana u 2012. godini u okviru flote s prosječnom emisijom CO₂ od 90 - 100 g/km. Nerealni otpori vozila korišteni u homologaciji tipa vozila identificirani su kao jedan od glavnih uzroka ovih razlika. Pojednostavljeni linearni model razvijen u istraživanju može se koristiti za predviđanje potrošnje goriva u realnim uvjetima na temelju javno dostupnih homologacijskih podataka. To se može upotrijebiti za ispravljanje faktora potrošnje goriva koji se trenutačno koriste u emisijskim modelima (npr. COPERT, HBEFA, VERSIT+ i drugi) ili se mogu samostalno koristiti za izradu projekcija potrošnje goriva uslijed promjena svojstava budućih putničkih automobila.

3. OBJEKT ISTRAŽIVANJA: FLOTA VOZILA M1 U REPUBLICI HRVATSKOJ

Daleko najveći uzorak u floti cestovnih vozila Republike Hrvatske (RH) predstavljaju vozila kategorije M1, pa će i slučajne pogreške u prikupljenim podacima imati najmanji utjecaj na rezultate analiza. Nadalje, upravo su za ta vozila precizno definirani ciljevi u politikama Europske unije usmjerenim na ublažavanje klimatskih promjena, što je opisano u 2. poglavlju ovoga rada. Zbog tih razloga istraživanja su ograničena na flotu M1, odnosno na njezine emisije stakleničkih plinova i onečišćujućih tvari. Izračun ovih emisija napravljen je pomoću programa COPERT 5 koji je najčešće primjenjivan alat za procjenu emisija cestovnog transporta u Europi [65]. COPERT 5 koristi sljedeće ulazne podatke:

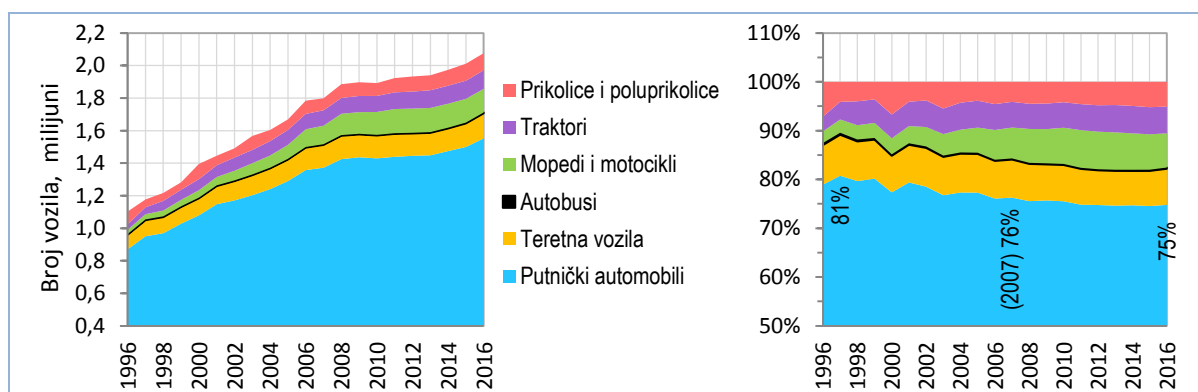
- broj vozila po pojedinim emisijskim razinama (Euro 1, ..., Euro 6)
- prevoženi put
- transportne aktivnosti i uvjeti u kojima se odvijaju
- utrošeno gorivo

Prva dva podatka sadržana su u bazama podataka Centra za vozila Hrvatske (CVH) i Ministarstva unutarnjih poslova (MUP). Transportne aktivnosti, koje u stvari predstavljaju spektar transportnog opterećenja, procijenjene su na temelju uzoraka u literaturi i u samom COPERT-u. Statistički podaci o utrošenom gorivu služe za dodatnu provjeru emisija procijenjenih COPERT-om.

U bazu CVH se unose podaci koji se prikupljaju u okviru redovitih tehničkih pregleda, a koji su preduvjet za registraciju vozila. Ovi podaci dopunjeni su podacima iz registra vozila MUP-a, jer nova vozila prvi put obavljaju tehnički pregled tek nakon dvije godine. Posebna pozornost poklonjena je odjavljenim vozilima, s obzirom na to da su se u promatranom razdoblju više puta mijenjali propisi koji reguliraju registraciju i uklanjanje vozila iz spomenutog registra. Baza CVH sadrži podatke o vozilima od 1996. godine. Od 2007. godine u bazu se unose *detaljni* podaci koji se bilježe pri periodičkim tehničkim pregledima, a CVH, kao jedna od prvih stručnih organizacija za provjeru tehničke ispravnosti vozila u Europi, od te godine bilježi i stanje putomjera, što je preduvjet za izračunavanje prevoženog puta od prethodnog pregleda. Za potrebe ovog istraživanja ti su podaci prethodno korigirani na način da su odbačeni ekstremi koji nastaju, primjerice, zato što nakon uvoza i registracije rabljenog vozila poneki vlasnik to vozilo proda, a prethodno drastično smanji broj prevoženih

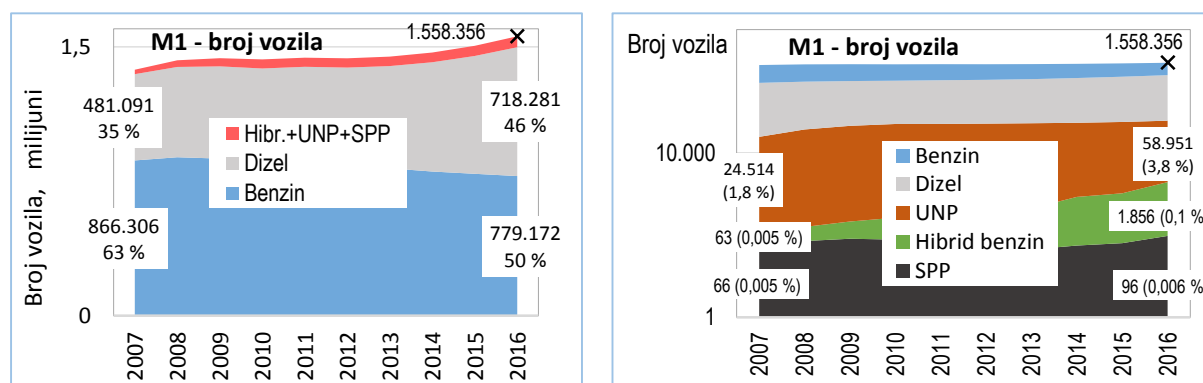
kilometara. Isto tako, postoje malobrojna vozila koja u svom proračunskom razredu (u COPERT-u) prevalljuju po nekoliko stotina tisuća kilometara godišnje, a zbog malog broja vozila u razredu jako odudaraju od prosjeka razreda i iskrivljuju njegovu objektivnu sliku.

Baza CVH sadrži sve relevantne podatke o vozilima potrebne za procjenu emisija: kategoriju vozila, godinu proizvodnje, radni obujam motora, pogonsko gorivo (benzin; dizel; bivalentna vozila: UNP-benzin, SPP-benzin; hibridna električna vozila), emisijsku razinu i prevoženi put u godini dana. S obzirom na to da podaci prije 2007. godine nisu dovoljno detaljni, prethodne godine nisu obuhvaćene ovom analizom. Podaci o potrošnji goriva dobiveni su od Državnog zavoda za statistiku.



Slika 3.1. Struktura flote prema kategorijama vozila u RH od 1996 do 2016. godine

3.1. Struktura flote prema vrsti goriva

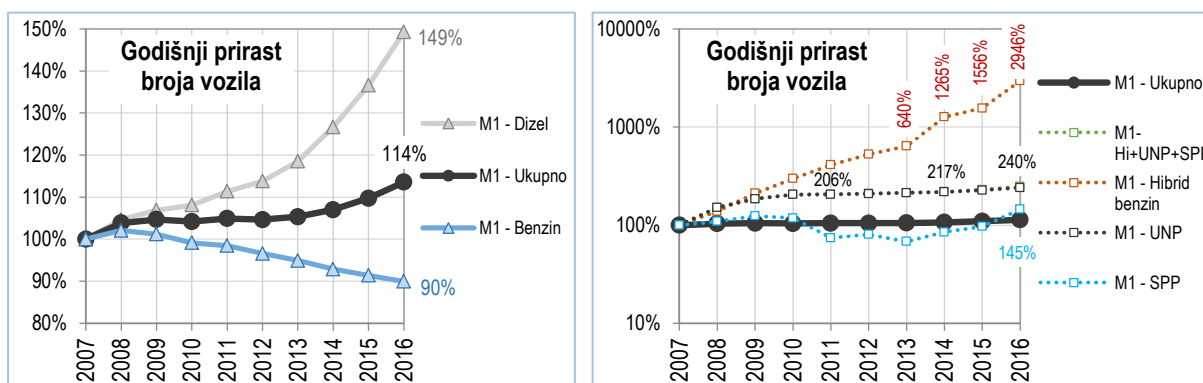


Slika 3.2. Struktura flote vozila M1 prema vrsti pogonskoga goriva
(znakom x označena je točka/godina na koju se odnosi obližnja brojčana vrijednost)

Struktura flote M1 analizirana je u prema gorivima i emisijskim razinama. Brojčani rezultati su dani u tablici 3.2. Na temelju pokazanih dijagrama (slike 3.2. i 3.3.) mogu se za promatrano desetogodišnje razdoblje, od 2007. do 2016. godine, izvesti sljedeći zaključci:

1. Nakon razdoblja stagnacije od 2009. do 2012. godine broj vozila se polagano ali konstantno povećava, bez pokazivanja znakova zasićenja te je na kraju 2016. dostigao 1.558.356 jedinica.

2. Tendencije promjena broja i omjera automobila sa Ottovim i automobila sa Diesellovim motorom:
 - broj automobila sa Ottovim motorom se u gotovo cijelom razdoblju konstantno smanjuje (od 866.306 na 779.172), a broj automobili sa Diesellovim motorom naglo raste (od 481.092 na 718.281)
 - broj automobila sa Ottovim motorom je na početku promatranog razdoblja bio gotovo dvostruko veći (63:35), a na kraju su gotovo izjednačeni (50:46).
 3. Od ostalih vozila značajnija su samo ona pogonjena ukapljenim naftnim plinom (UNP). Njihov udio u M1 je u deset godina narastao s 1,8 na 3,8 % te je dostigao brojku od 58.951 vozila.
 4. Hibridni električni automobili sa Ottovim motorom su na kraju 2016. dostigla brojku od 1.856 jedinica, čime se njihov udio u M1 povećao u deset godina s 0,005 % na 0,1 %.
- Međutim, hibridni električni automobili sa Ottovim motorom imaju stalan i vrlo visok godišnji prirast. Njihov broj je udvostručen 2014. godine u odnosu na 2013. i 2016. u odnosu na 2015. godinu.
5. Putnički automobili na pogon stlačenim prirodnim plinom (SPP) su na kraju 2016. dostigli tek 96 jedinica, odnosno udio u M1 od svega 0,006 %.

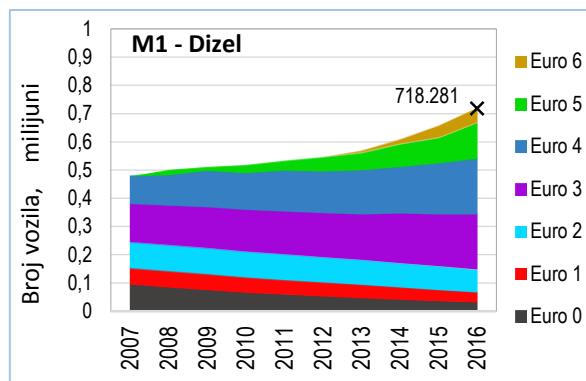
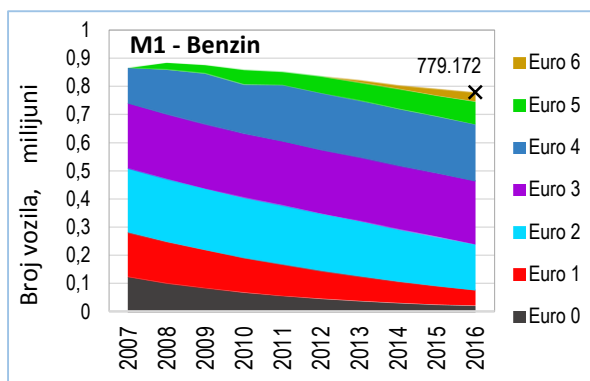
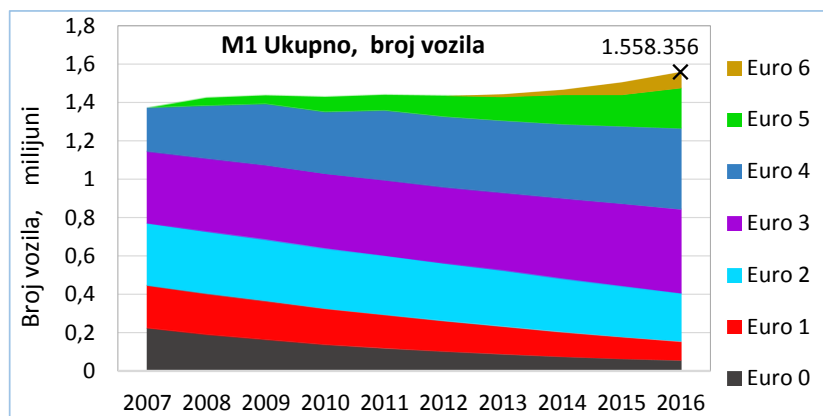


Slika 3.3. Prirast broja vozila M1 u odnosu na početnu 2007. godinu

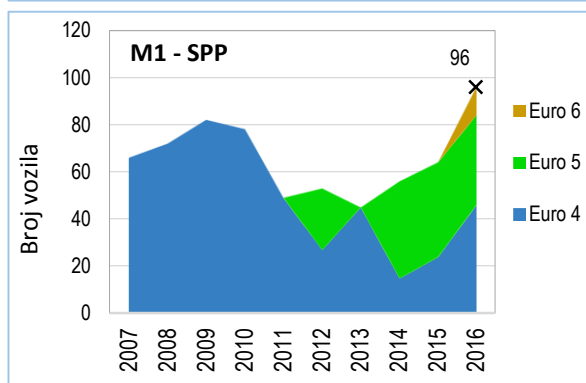
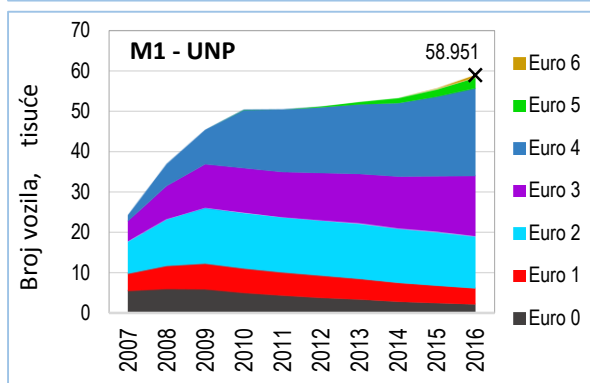
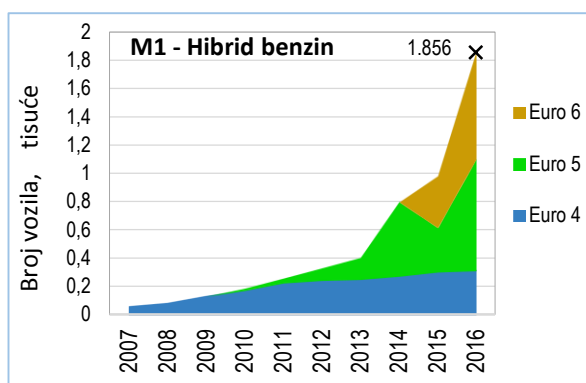
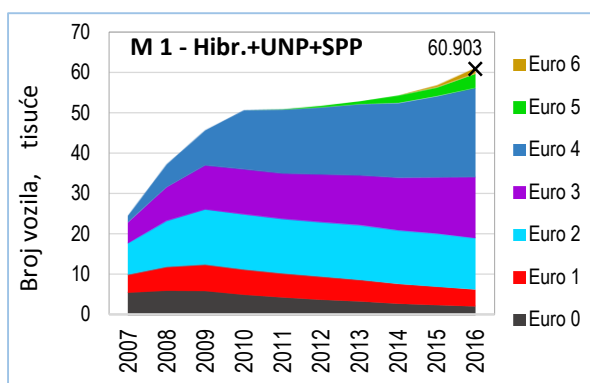
U 2016. godini broj stanovnika u RH prema podacima Državnog zavoda za statistiku [49] iznosio je 4.174.349, što uz 1.558.356 vozila M1 daje omjer od 373 putnička automobila na 1.000 stanovnika. Prema podacima Eurostata [50] Hrvatska (374 putnička automobila) je u EU-28 po tom kriteriju bila na 25. mjestu, Slovenija na 10. (531 vozilo), dok je prosjek u EU-28 iznosio 505 putničkih automobila na 1.000 stanovnika.

3.2. Struktura flote prema emisijskoj razini

U floti M1 kao cjelini dominiraju Euro 3 i Euro 4 automobili, a ista situacija je i u dijelovima flote koji kao pogonsko gorivo koriste benzin i dizelsko gorivo (slika 3.7.). Pritom je taj negativan trend uporabe ovih vozila sa zastarjelim tehnologijama pročišćavanja ispušnih plinova nepovoljniji kod automobili sa Diesellovim motorom, gdje čak i udio Euro 2 u promatranom desetogodišnjem razdoblju ostaje gotovo konstantan, a udjeli Euro 3 i Euro 4 i dalje rastu.

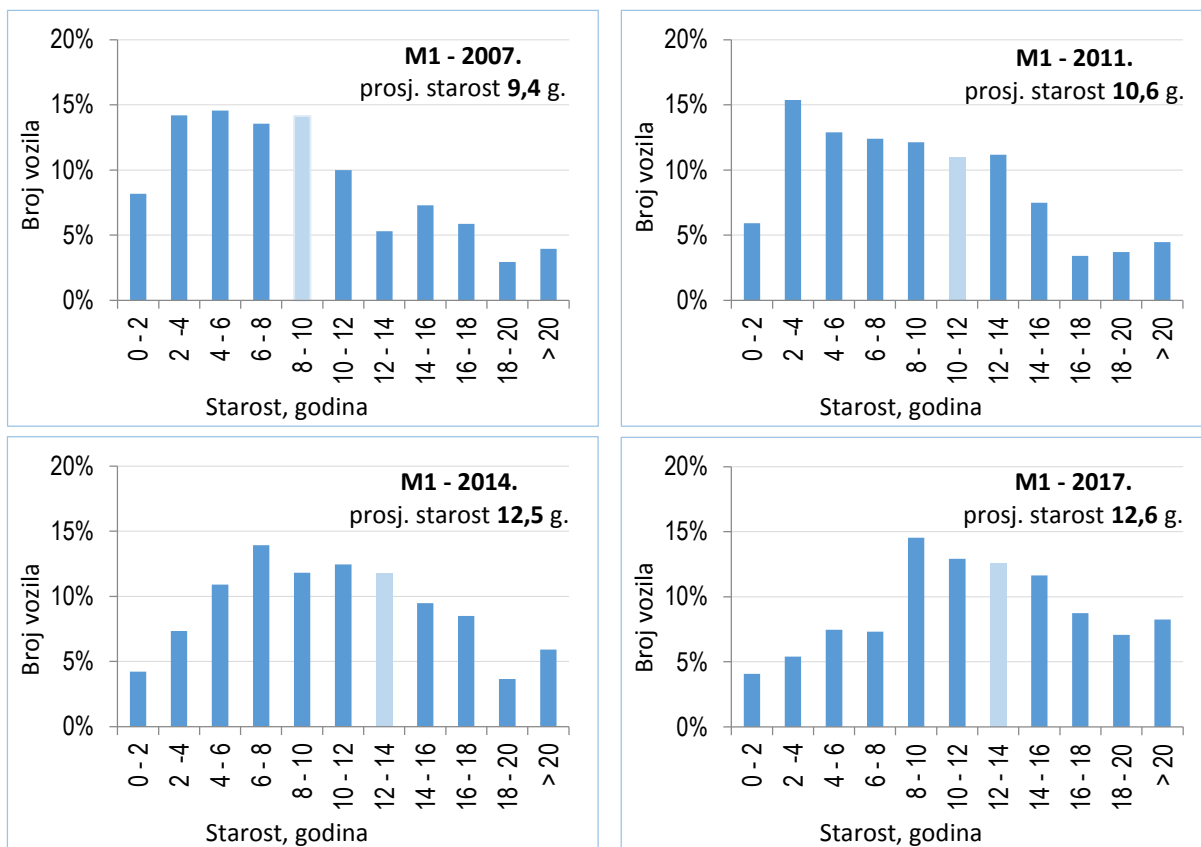


Slika 3.4. Struktura flote vozila M1 i njenih glavnih sastavnica prema emisijskoj razini i vrsti pogonskoga goriva: flota ukupno, benzin i dizel

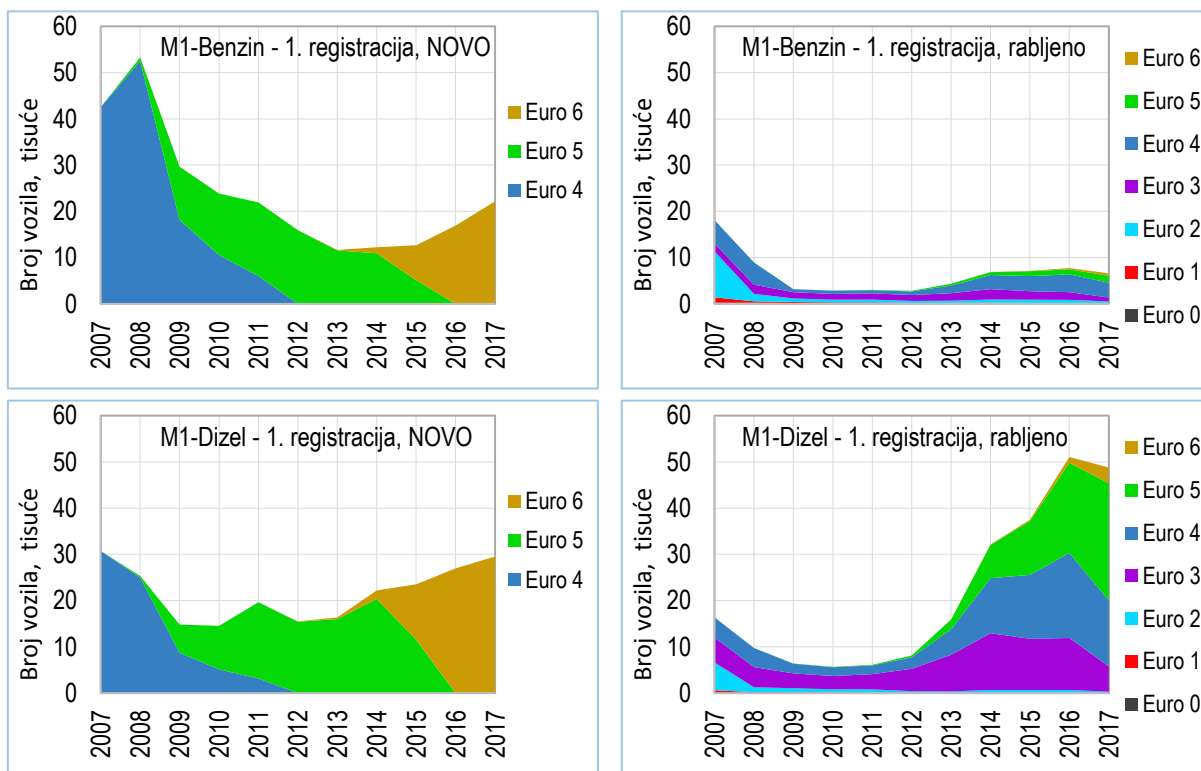


Slika 3.5. Struktura marginalnog dijela flote M1 prema emisijskoj razini i vrsti goriva: UNP, SPP i hibridna električna vozila (znakom x označena je sumarna vrijednost u 2016. g.)

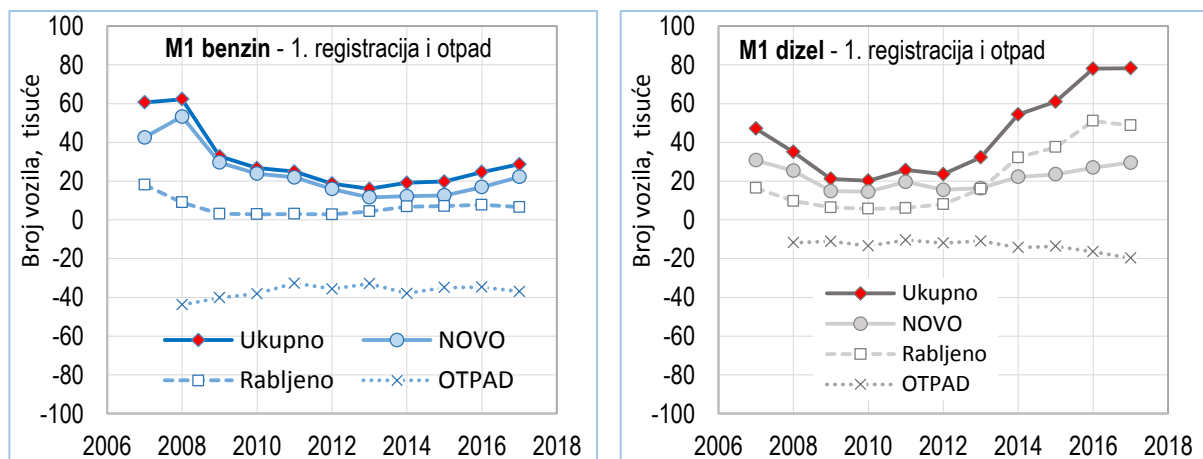
3.3. Pokazatelji obnavljanja flote



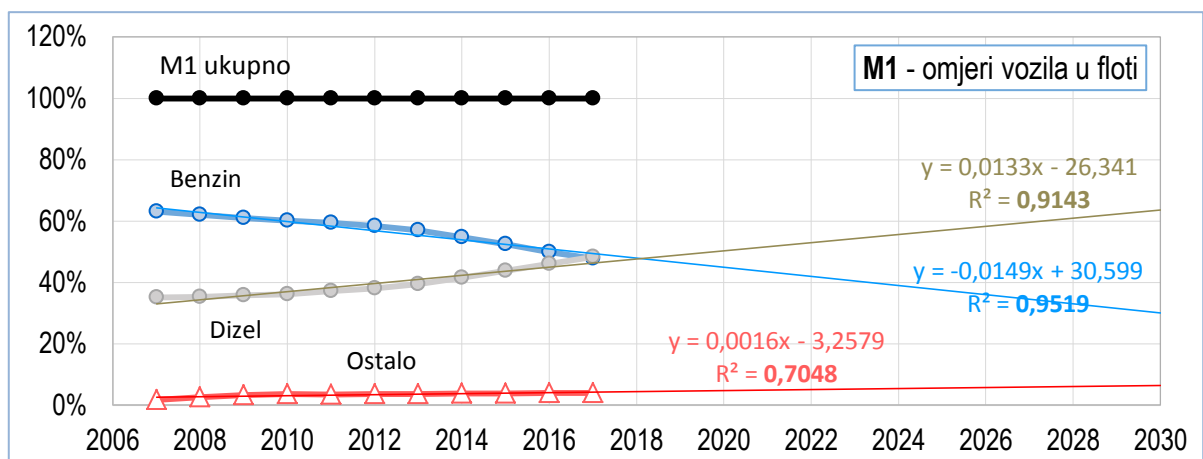
Slika 3.6. Starosna struktura flote M1 u pojedinim kalendarskim godinama



Slika 3.7. Broj i emisijska struktura prvi put registriranih vozila M1



Slika 3.8. Broj prvi put registriranih (novih + rabljenih) vozila i broj otpadnih/odjavljenih vozila u floti M1



Slika 3.9. Udjeli vozila u floti, prema vrsti goriva i projekcije do 2030. godine

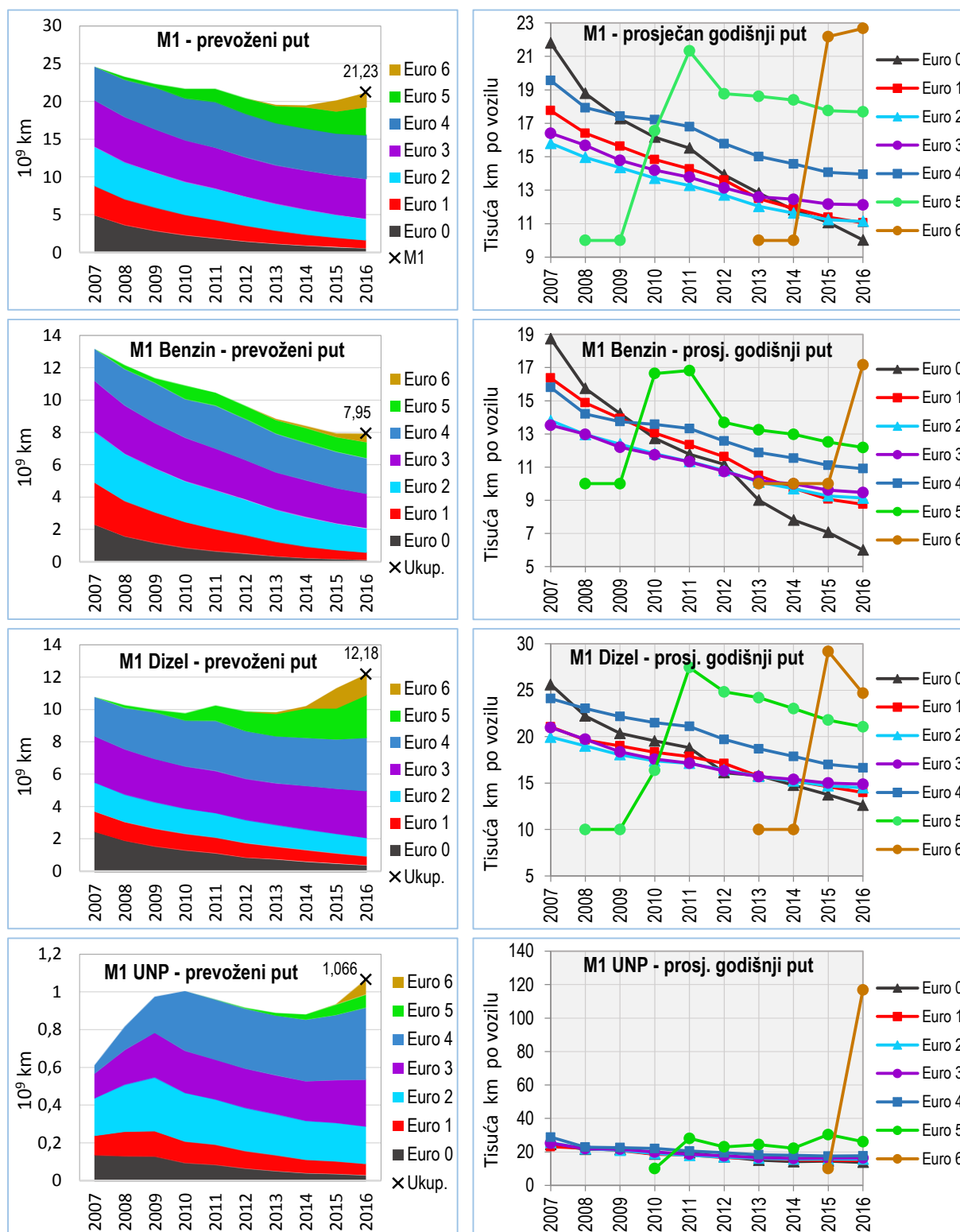
Visoke vrijednosti koeficijenta determinacije R^2 na slici 3.9. pokazuju da su prikazani linearni trendovi izrazito čvrsti i, ako se ne poduzmu drastične mjere, bit će održani i u budućnosti.

S protekom vremena sve je manje novih vozila, a sve više starih (slika 3.6.). Među prvi put registriranim vozilima tek se od 2013. godine opaža porast broja novih vozila (slika 3.7.). Porast broja prvi put registriranih rabljenih automobila sa Dieselovim motorom je izrazito velik i to će značajno otežati postizanje obvezujućeg smanjenja emisija stakleničkih plinova do 2030. godine (donji desni dijagram na slici 3.7., desni na slici 3.8. i slika 3.9.).

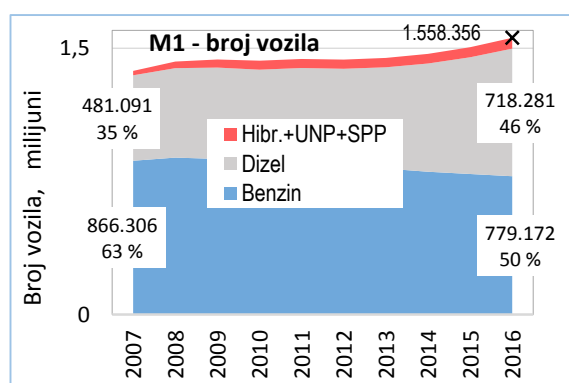
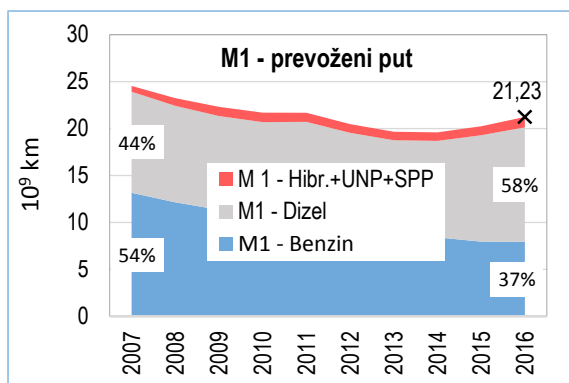
3.4. Prevoženi put flote M1

Slika 3.4. pokazuje da je najveći dio flote M1 emisijske razine Euro 3 (na snazi od 2000. do 2004.) i Euro 4 (od 2005. do 2008.). U 2016. godini ta su vozila ostvarila 50 % ukupnog prevoženog puta (slika 3.10.). Konzistentnost baze podataka o vozilima CVH dobro pokazuju dijagrami prosječnog godišnjeg puta (na slici 3.10. desno) na kojima se jasno vidi da je prosječan godišnji put vozila to veći što je veća emisijska razina (Euro n). (Po dvije početne točke Euro 5 i Euro 6 s iznosom od 10.000 km su u bazu upisane kao fiktivne vrijednosti za nova vozila koja se na prvom tehničkom pregledu pojavljuju tek nakon dvije godine.) U 2017. godini 46 % flote M1 čine automobili sa Dieselovim motorom (od 2007. njihov je udio

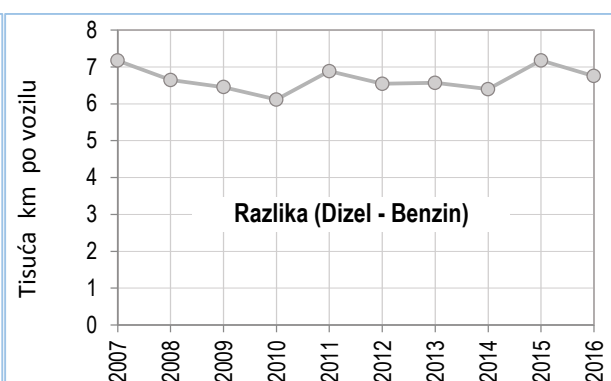
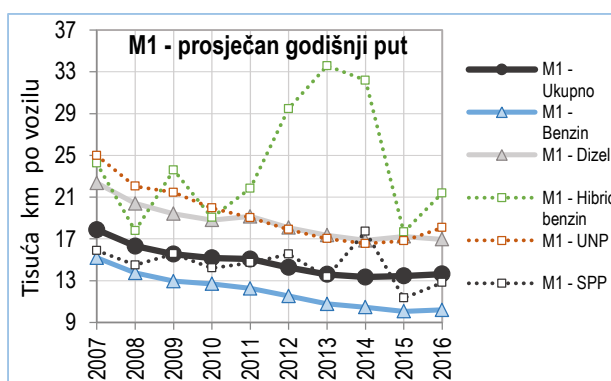
povećan za 1/3) koji ostvaruju 58 % ukupnog prevoženog puta (slika 3.11.). Prosječan godišnji put kod automobila sa Dieslovim motorom u cijelom razdoblju je veći nego kod automobila sa Ottovim motorom za stalnih 6 do 7 tisuća kilometara (slika Slika 3.12.). Novija vozila ostvaruju veći prosječan godišnji put (slika 3.13.).



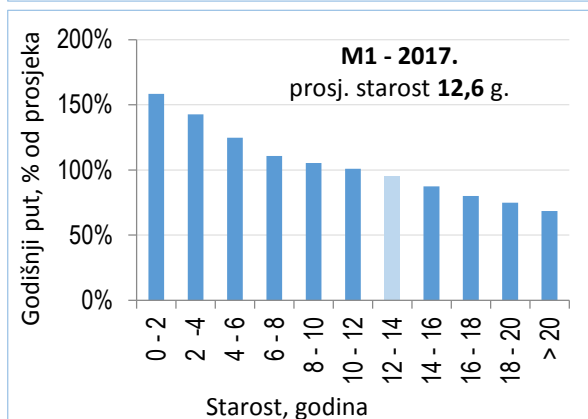
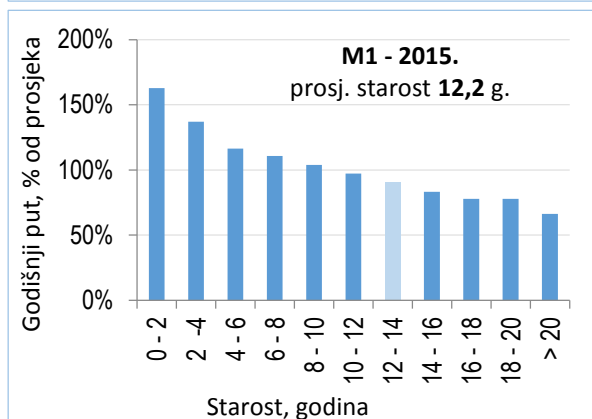
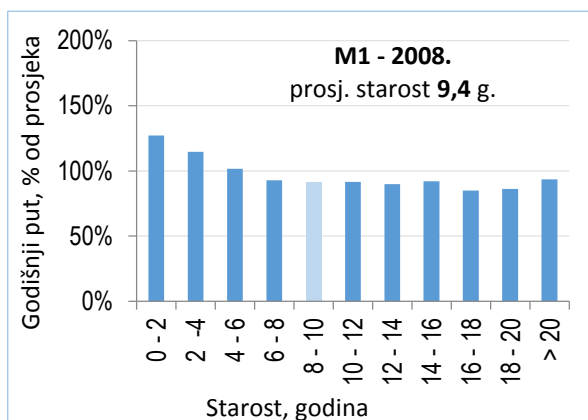
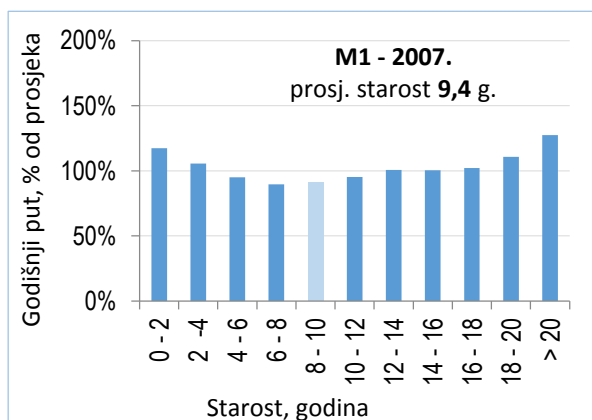
Slika 3.10. Ukupan prevoženi put flote M1 i prosječan godišnji put vozila prema pogonskom gorivu i emisijskoj razini vozila. Hibridi i SPP vozila nisu prikazani, jer je njihov udio u ukupnom broju vozila M1 i u prevoženom putu zanemarivo malen (vidi sliku 3.2.).



Slika 3.11. Omjeri ukupnog prevoženog puta (lijevo) i broja vozila u floti (desno)



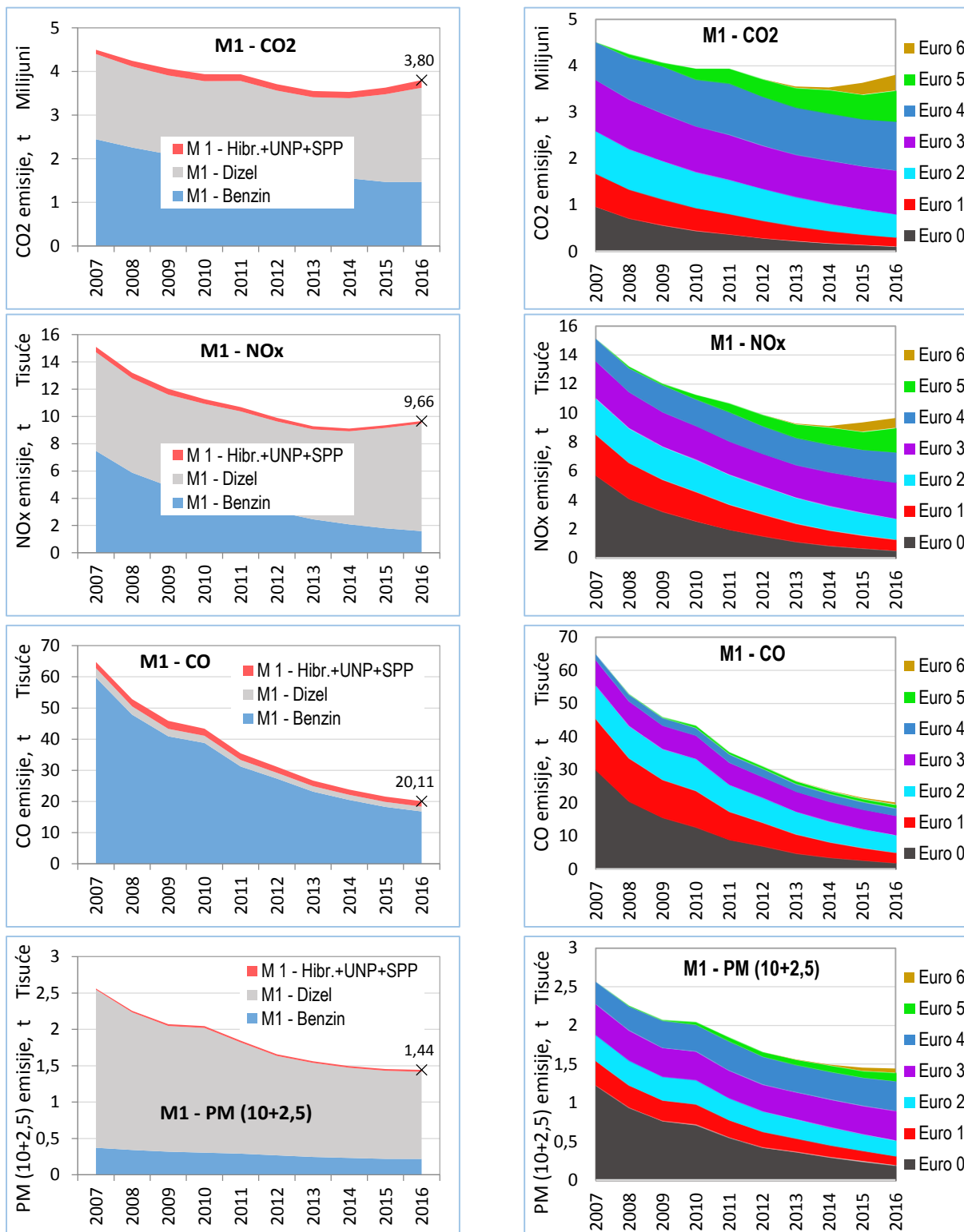
Slika 3.12. Struktura prevoženog puta vozila M1 prema vrsti pogonskoga goriva



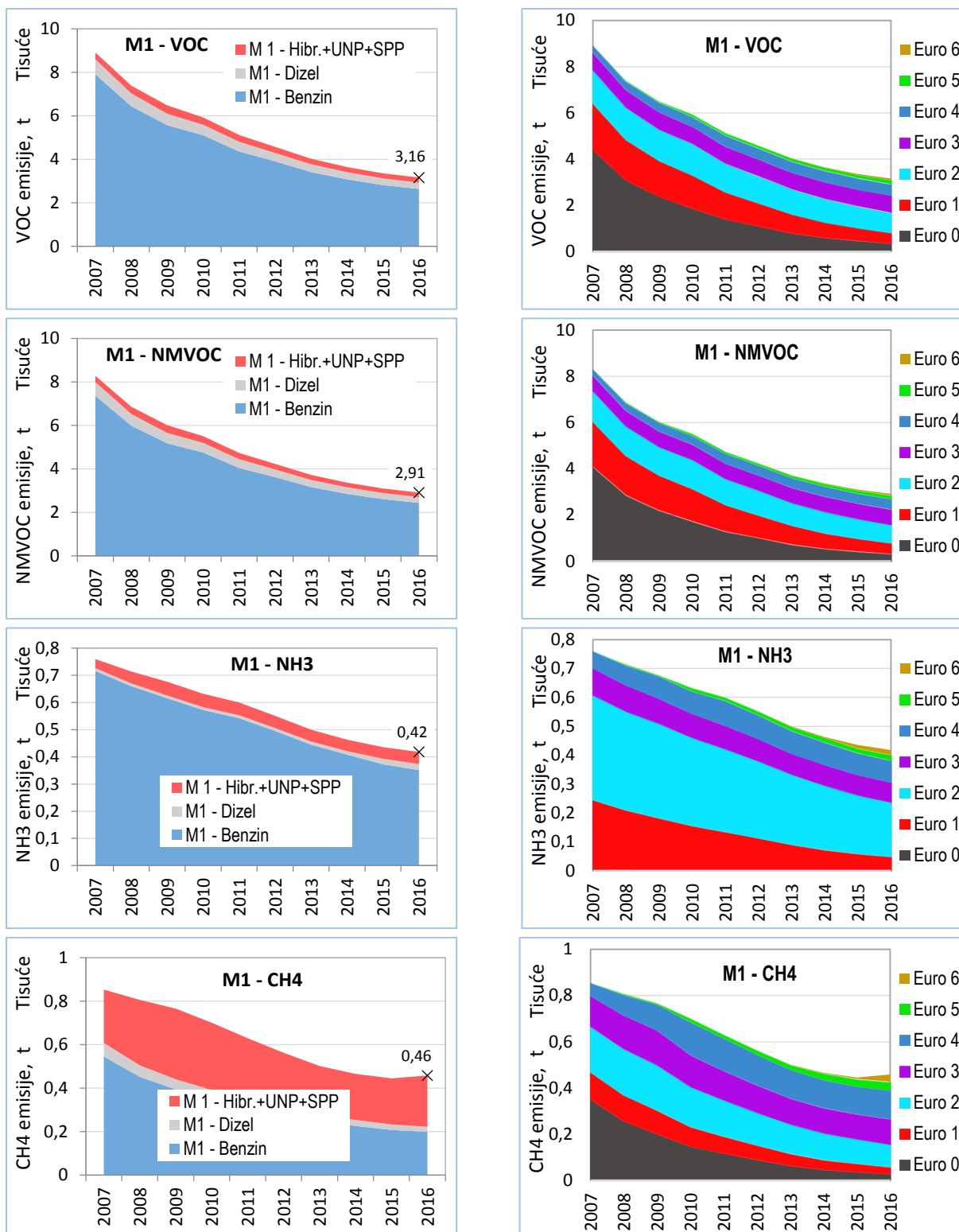
Slika 3.13. Godišnji put vozila kao postotak prosječnog puta, u ovisnosti od starosti vozila

3.5. Emisije flote M1

Emisije CO₂ (slika 3.14.) izravno su proporcionalne prevoženom putu (slika 3.11.) i ne opadaju usprkos sve većem udjelu automobili sa Dieslovim motorom. Emisije NO_x, CO i PM opadaju, jer prosječan godišnji put opada sa starošću vozila (slika 3.10.).



Slika 3.14. Emisije (COPERT 5) flote M1 prema vrsti goriva i emisijskoj razini vozila



Slika 3.15. Emisije flote M1 prema vrsti goriva i emisijskoj razini vozila (nastavak)

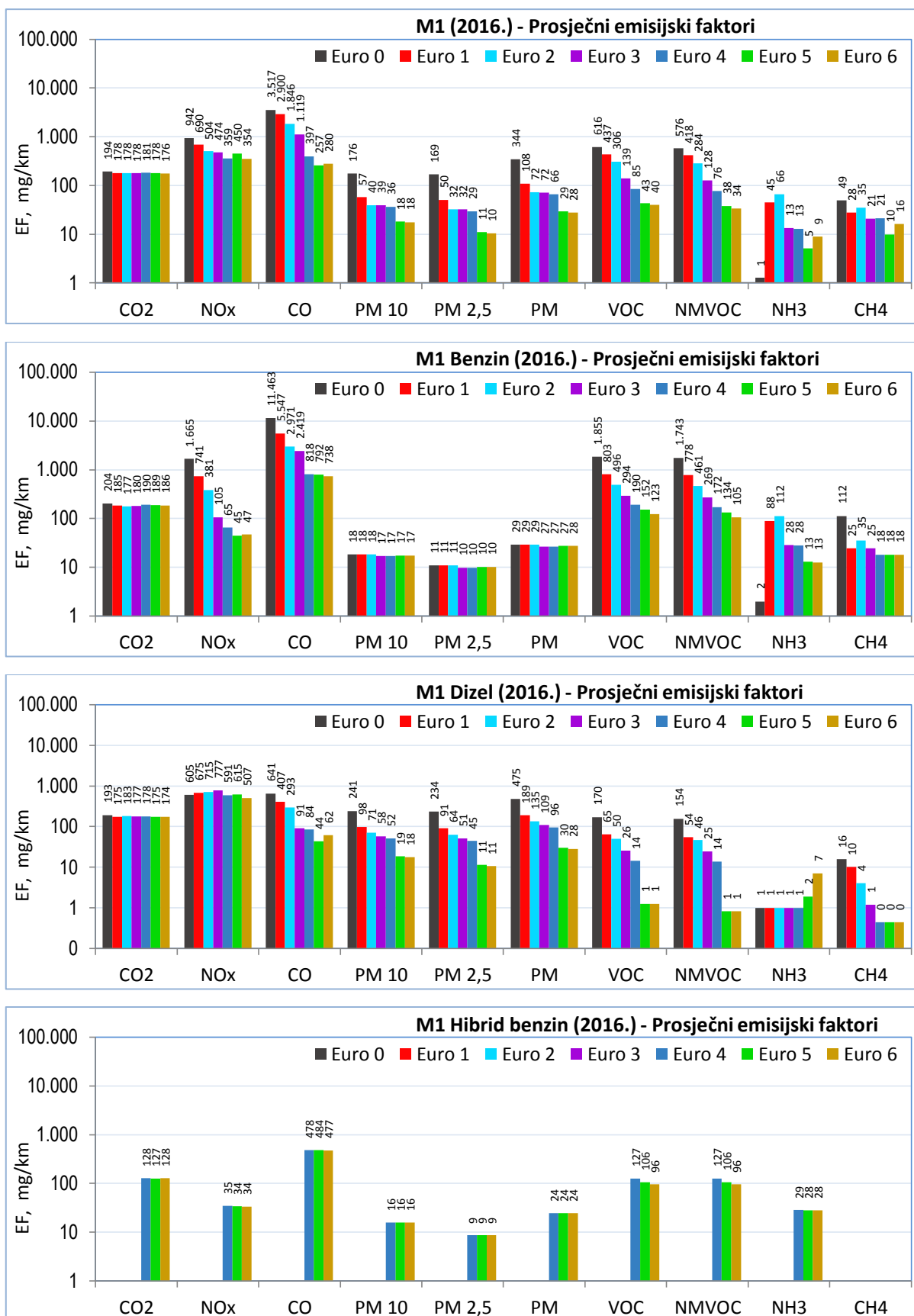
Ohrabrujuće u emisijama flote je to što se emisije (osim CO_2) u apsolutnom iznosu smanjuju, premda se broj vozila stalno povećava. Osim stalnog tehničkog napretka, doprinos ovom smanjenju daje i činjenica da se zbog skupoće ljudi sve manje voze (vidi slike 3.11.i Slika 3.12.).

3.6. Emisijski faktori flote M1 i usporedba s drugim izvorima

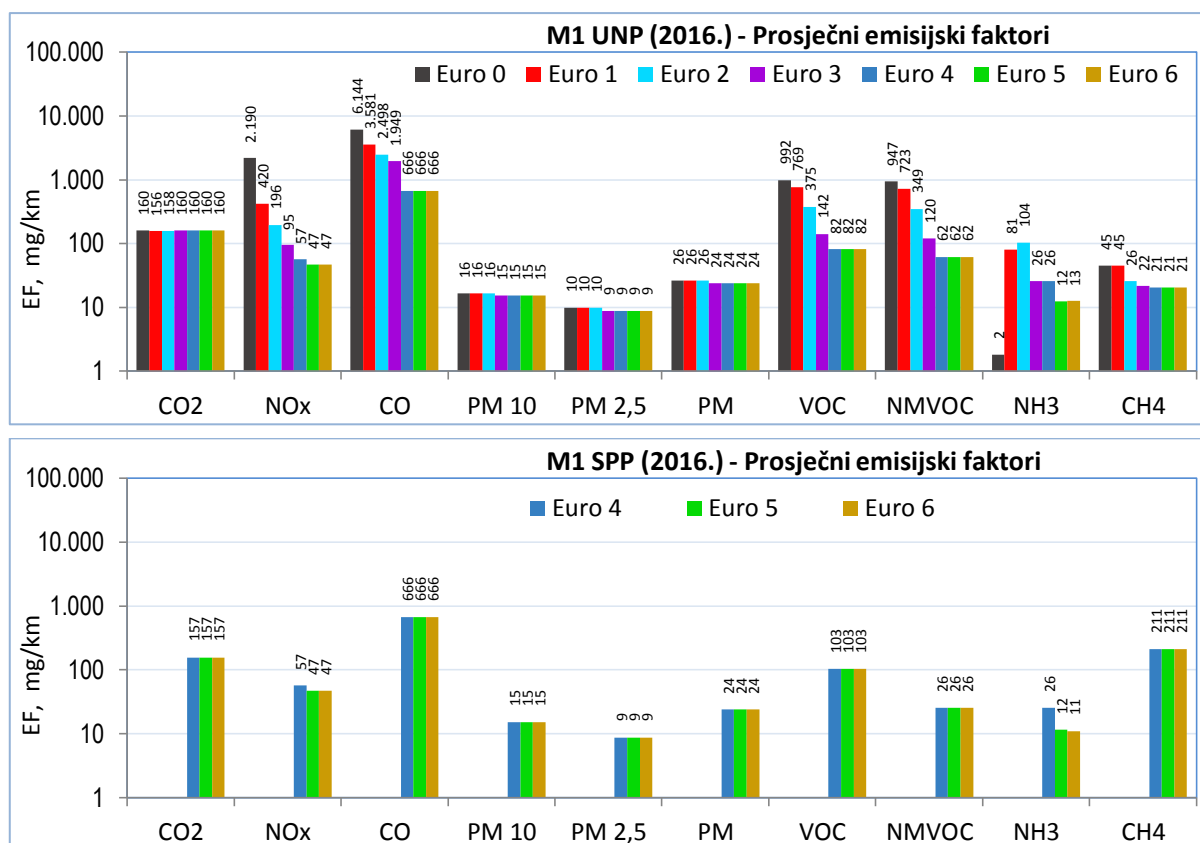
U programu COPERT 5 vozila su razvrstana u razrede prema vrsti goriva, emisijskoj razini (Euro *n*), radnom obujmu motora i vrsti pogonskog sustava (klasičan motor s unutarnjim izgaranjem ili hibridno električno vozilo). Svaka skupina vozila ima svoj emisijski faktor. Prosječni emisijski faktori flote za pojedina pogonska goriva izračunati su kao kvocijent ukupnih emisija vozila pogonjenih tim gorivom i ukupnog prevoženog puta.

Tablica 3.1. Prosječni emisijski faktori flote M1 u 2016. godini
(crvene/sive ćelije – maksimalna/minimalna vrijednost retka/zadnjeg stupca).

Prosječni emisijski faktori flote M1 (2016.) - [mg/km]									
		Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6	EO...E6
EF CO ₂ g/km	Benzin	204	185	177	180	190	189	186	185
	Dizel	193	175	183	177	178	175	174	177
	Hibr.benz.+UNP+SPP	160	156	158	160	160	154	154	158
	Hibr.benz.	0	0	0	0	128	127	128	127
	UNP	160	156	158	160	160	160	160	160
	SPP	0	0	0	0	157	157	157	157
	Sva goriva	194	178	178	178	181	178	176	179
EF NO _x	Benzin	1.665	741	381	105	65	45	47	200
	Dizel	605	675	715	777	591	615	507	648
	Hibr.benz.+UNP+SPP	2.190	420	196	95	56	45	45	168
	Hibr.benz.	0	0	0	0	35	34	34	34
	UNP	2.190	420	196	95	57	47	47	173
	SPP	0	0	0	0	57	47	47	53
	Sva goriva	942	690	504	474	359	450	354	455
EF CO	Benzin	11.463	5.547	2.971	2.419	818	792	738	2.114
	Dizel	641	407	293	91	84	44	62	127
	Hibr.benz.+UNP+SPP	6.144	3.581	2.498	1.949	663	634	629	1.586
	Hibr.benz.	0	0	0	0	478	484	477	480
	UNP	6.144	3.581	2.498	1.949	666	666	666	1.628
	SPP	0	0	0	0	666	666	666	666
	Sva goriva	3517	2900	1846	1119	397	257	280	947
PM	Benzin	29	29	29	27	27	27	28	28
	Dizel	475	189	135	109	96	30	28	98
	Hibr.benz.+UNP+SPP	26	26	26	24	24	24	24	25
	Hibr.benz.	0	0	0	0	24	24	24	24
	UNP	26	26	26	24	24	24	24	25
	SPP	0	0	0	0	24	24	24	24
	Sva goriva	344	108	72	72	66	29	28	68
VOC	Benzin	1.855	803	496	294	190	152	123	332
	Dizel	170	65	50	26	14	1	1	24
	Hibr.benz.+UNP+SPP	992	769	375	142	83	87	85	212
	Hibr.benz.	0	0	0	0	127	106	96	104
	UNP	992	769	375	142	82	82	82	216
	SPP	0	0	0	0	103	103	103	103
	Sva goriva	616	437	306	139	85	43	40	149
NMVOC	Benzin	1.743	778	461	269	172	134	105	307
	Dizel	154	54	46	25	14	1	1	22
	Hibr.benz.+UNP+SPP	947	723	349	120	63	69	68	189
	Hibr.benz.	0	0	0	0	127	106	96	104
	UNP	947	723	349	120	62	62	62	192
	SPP	0	0	0	0	26	26	26	26
	Sva goriva	576	418	284	128	76	38	34	137
NH ₃	Benzin	2	88	112	28	28	13	13	44
	Dizel	1	1	1	1	1	2	7	2
	Hibr.benz.+UNP+SPP	2	81	104	26	26	15	16	40
	Hibr.benz.	0	0	0	0	29	28	28	28
	UNP	2	81	104	26	26	12	13	41
	SPP	0	0	0	0	26	12	11	20
	Sva goriva	1	45	66	13	13	5	9	20
CH ₄	Benzin	112	25	35	25	18	18	18	25
	Dizel	16	10	4	1	0	0	0	2
	Hibr.benz.+UNP+SPP	216	210	213	215	215	208	207	213
	Hibr.benz.	0	0	0	0	0	0	0	0
	UNP	45	45	26	22	21	21	21	24
	SPP	0	0	0	0	211	211	211	211
	Sva goriva	49	28	35	21	21	10	16	22



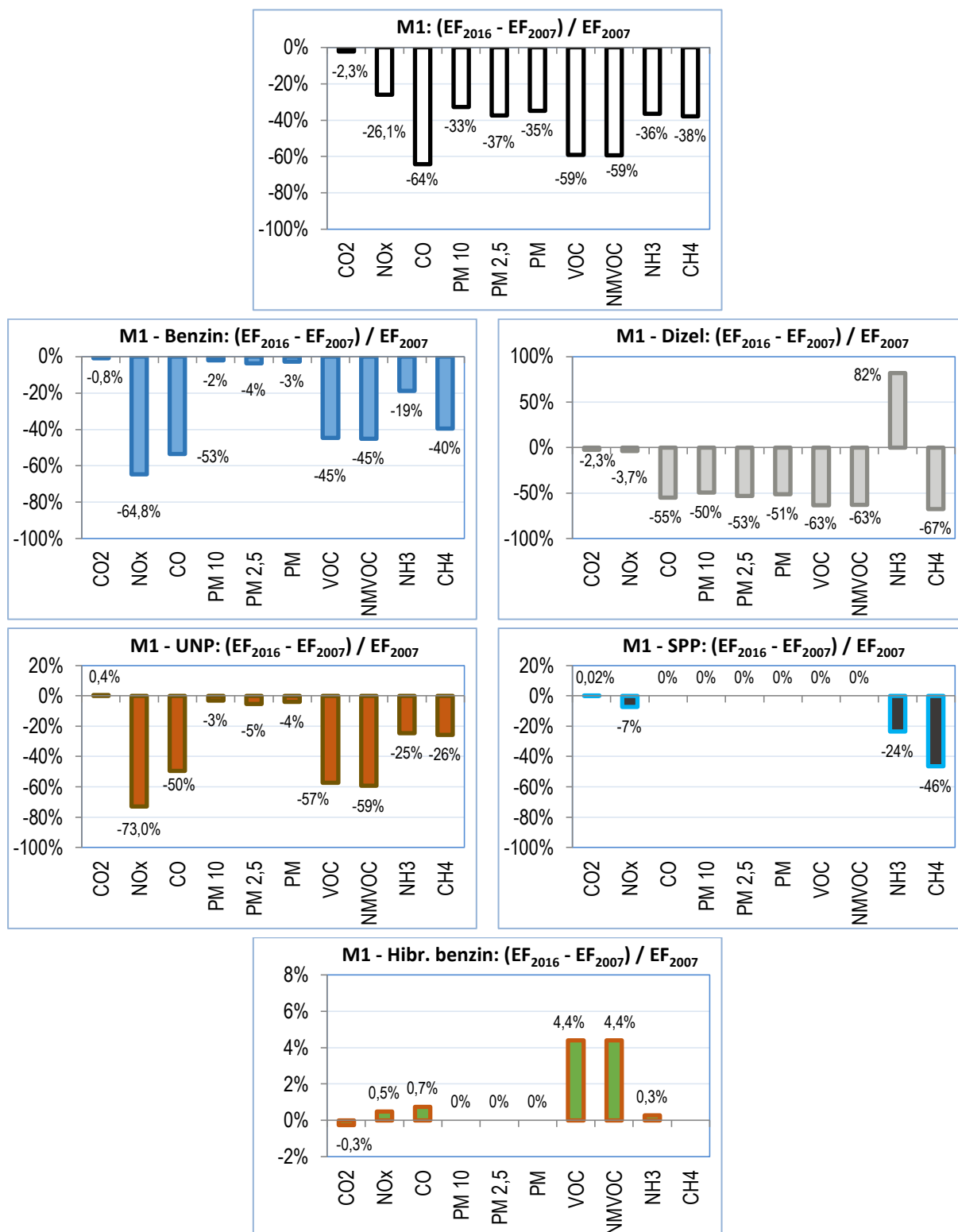
Slika 3.16. Prosječni emisijski faktori Flote M1 u 2016. godini
(samo za CO₂: g/km) - dio 1 od 2



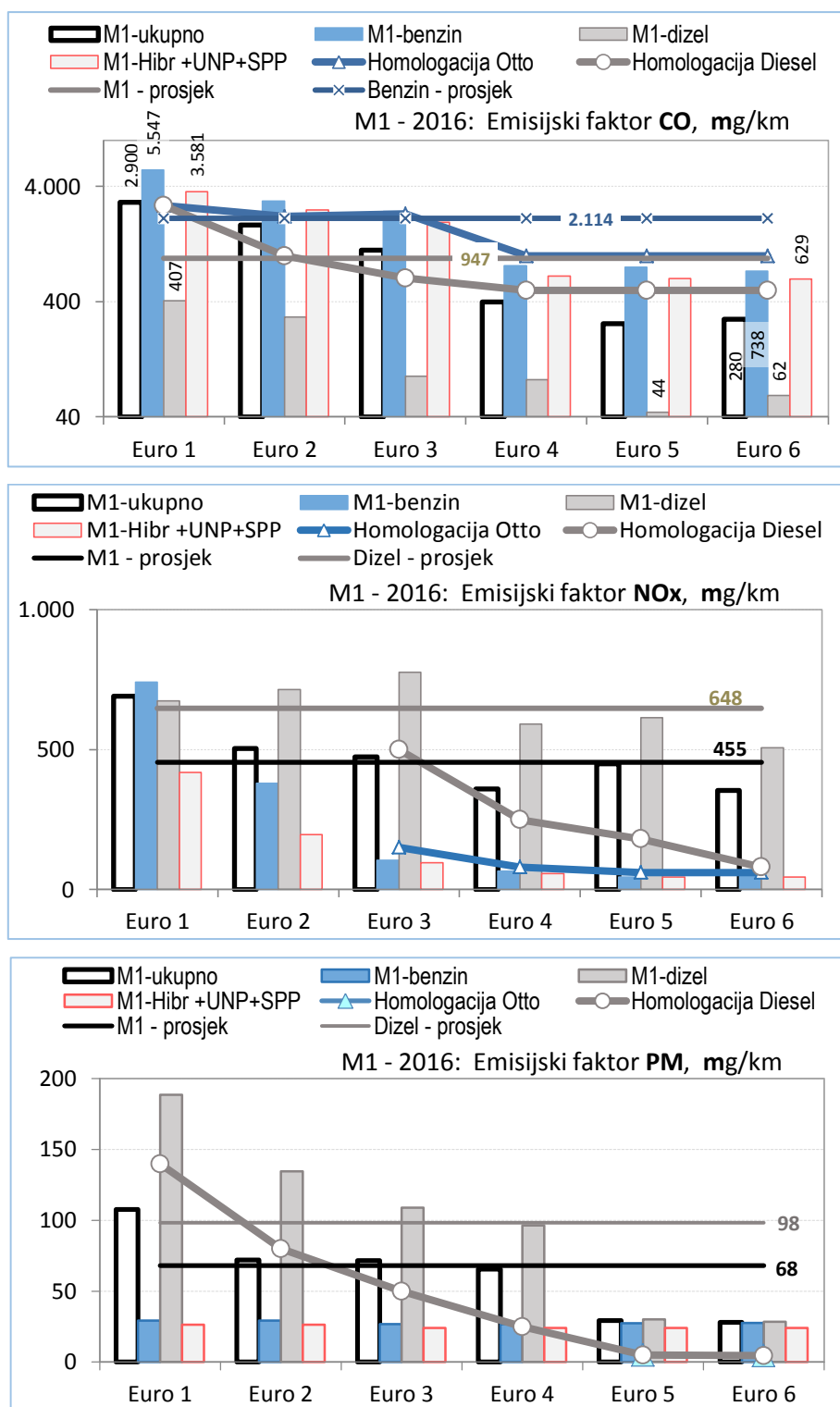
Slika 3.17. Prosječni emisijski faktori Flote M1 u 2016. godini
(samo za CO₂: g/km) - dio 2 od 2

Usporedba prosječnih emisijskih faktora flote M1 i homologacijskih granica. U tablici 3.1. i u dijagramima na sl. 3.16. i 3.17. pokazani su emisijski faktori deset sastojaka u ispušnim plinovima motora cestovnih motornih vozila. Od tih deset homologacijskim su propisima ograničena samo tri sastojka: CO, NO_x i čestice PM. Usporedba njihovih emisijskih faktora s homologacijskim granicama pokazana je na slici 3.19. Kada bi sustavi za pročišćavanje ispušnih plinova na vozilima bili ispravni, prosječni emisijski faktori bili bi manji od homologacijskih granica. U slučaju hrvatske flote M1 emisije CO kod Diesellovih su motora ispod dopuštenih granica, kao što je i očekivano, zbog izgaranja uz višak zraka. Emisije kod Ottovih motora s klasičnim pogonskim gorivom i Ottovih motora s pogonom na ukapljeni naftni plin od razine Euro 3 naviše također su unutar limita. Međutim, problem su prekomjerne emisije dušikovih oksida i čestica kod Diesellovih motora, ne samo zbog možebitnih neispravnosti sustava za pročišćavanje, nego ponajviše zbog „friziranja“ homologacijskih rezultata i manipulacija od strane proizvođača vozila. Kao posljedica toga, prosječni emisijski faktori većinom premašuju homologacijske granice, višestruko kod dušikovih oksida NO_x i čestica PM novijih i novih vozila (Euro 5 i Euro 6, slika 3.19.). Ova prekoračenja odgovaraju onima utvrđenim u radovima opisanim u 2. poglavlju ovoga rada. U tom je pogledu Hrvatska u istoj situaciji kao i druge zemlje Europske unije (vidi primjer Nizozemske na slici 3.23.). Emisije čestica PM prelaze dopuštene granice i kod automobila sa Ottovim motorom Euro 5 i Euro 6.

Opadanje prosječnih emisijskih faktora od 2007. do 2016. godine u hrvatskoj floti M1 pokazano je dijagramima na slici 3.18. Svi faktori s protekom vremena opadaju, što je posljedica tehničkog napretka. Jedino je emisijski faktor amonijaka NH_3 , kod Diesellovih motora, veći u 2016. godini, kao posljedica primjene sustava selektivne katalitičke redukcije dušikovih oksida u kojima se otopina ureje pretvara u amonijak.

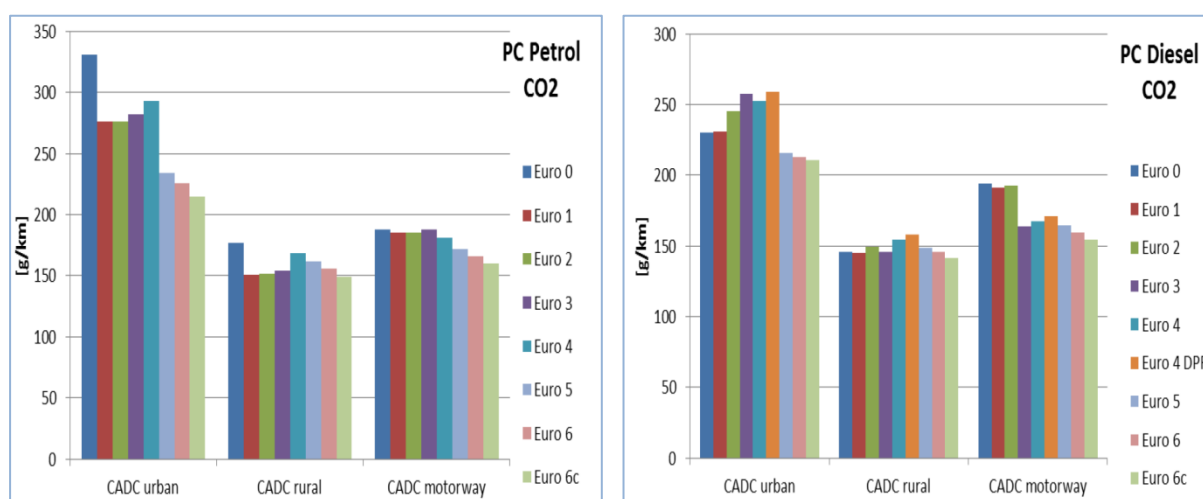


Slika 3.18. Relativne promjene emisijskih faktora od 2007. do 2016. godine, cjelokupne flote M1 i njenih sastavnica prema vrsti goriva

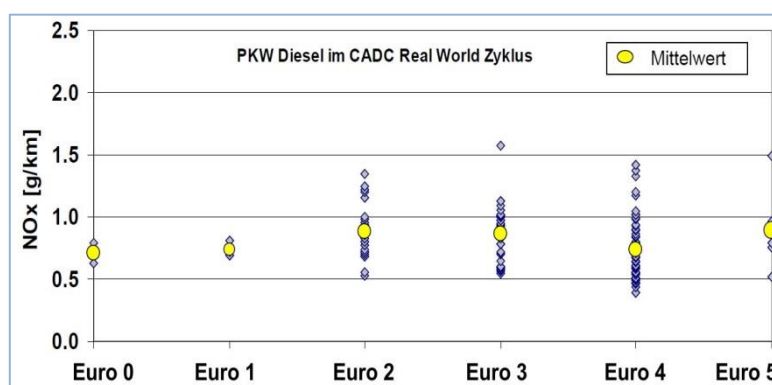


Slika 3.19. Sastojci u ispušnim plinovima ograničeni homologacijskim propisima: usporedba prosječnih emisijskih faktora u 2016. g. i homologacijskih granica [1]

Usporedba prosječnih emisijskih faktora s drugim izvorima. Pregledom literaturnih podataka o emisijskim faktorima ustanovljeno je da su vrijednosti faktora hrvatske flote na razini flota ostalih država. Emisijski faktori $EFCO_2$ za Ottove i Dieslove motore podudaraju se s onima navedenim u priručniku HBEFA [51], [52] (slika 3.20.), a također i s rezultatima mjerenja uređajem PEMS¹¹ u uvjetima stvarnog transporta [53]. I vrijednosti za UNP i SPP su u rangu onih u literaturi [54]. Nakon afere „Dieselgate“, koja je izbila u jesen 2015., najveću pozornost pobuđuju velika rasipanja rezultata mjerenja dušikovih oksida [53], [55], [56], [57]. Da homologacijske vrijednosti ne odgovaraju stvarnim rezultatima, bilo je poznato još znatno ranije [58] (slika 3.21.). Tijekom posljednjih nekoliko godina vrijednosti emisijskih faktora konstantno se korigiraju naviše (slika 3.22.). Usprkos tome, u 2016. godini prosječan emisijski faktor njemačke flote M1 iznosio je 767 mg NO_x/km, umjesto očekivanih 575¹². Isti problemi su i u Nizozemskoj (slika 3.23.).



Slika 3.20. Emisijski faktori CO₂ prema priručniku HBEFA 3.2 u ispitnom ciklusu CADC¹³ prosječnog automobila pogonjenog Ottovim motorom (lijevo) i Dieslovim (desno) [51]

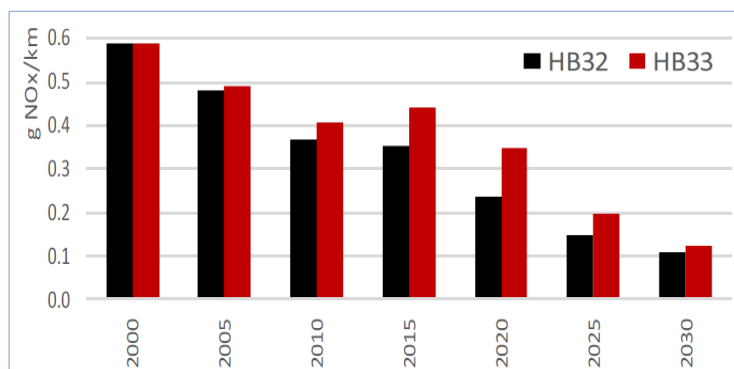


Slika 3.21. Veliko rasipanje emisijskih faktora NO_x kod mjerenja na 154 automobila sa Dieslovim motorom u ciklusu CADC koji dobro predstavlja uvjete stvarne vožnje [58]

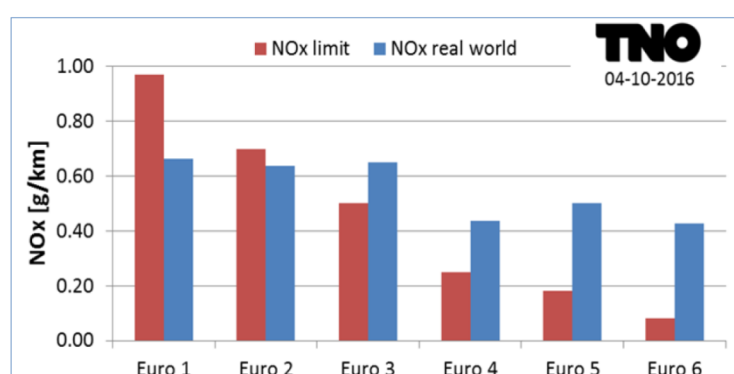
¹¹ PEMS - Portable Emissions Measurement System, u prijevodu: prijenosni sustav za mjerenje emisija

¹² UBA 25.4.2017. [59]

¹³ CADC – Common Artemis Driving Cycles



Slika 3.22. Prosječni emisijski faktori NO_x njemačke flote M1 prema HBEFA 3.2 (objavljeno 2014.) i HBEFA 3.3. (objavljeno krajem 2016.) [52]



Slika 3.23. Emisijski faktori NO_x¹⁴ za nizozemsku flotu M1 u 2015. godini: počevši od Euro 3 stvarne emisije su veće od dopuštenih. [60]

3.7. Profil prosječnog vozila flote M1

Za svaku godinu promatranog razdoblja od 2007. do 2016. godine izrađen je profil prosječnog vozila flote M1, koji obuhvaća sljedeće parametre: prosječnu starost vozila, prosječnu masu praznog vozila upisanu u prometnu dozvolu, prosječan radni obujam motora, prosječnu snagu motora, prosječan godišnji put vozila, prosječnu emisiju CO₂ (izračunatu programom COPERT 5) i prosječnu potrošnju goriva (izračunatu iz emisije CO₂ i udjela ugljika u gorivu¹⁵). Rezultati su pokazani u tablici 3.2. i u dijagramima na slikama 3.24. do 3.26.

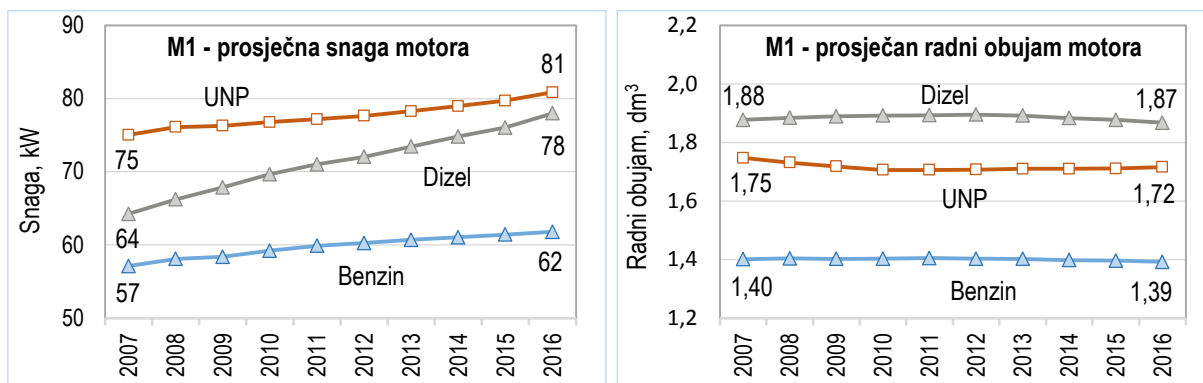
¹⁴ NO_x limit, – granični faktori izračunati na temelju dopuštenih emisija u pojedinim emisijskim razinama; NO_x real world – emisijski faktori izmjereni u uvjetima stvarnog transporta.

¹⁵ Izračunate su samo emisije CO₂ a ne ukupne emisije svih stakleničkih plinova. Na ovaj način iskazuju emisije CO₂ i potrošnju goriva i proizvođači automobila. Od ostalih stakleničkih plinova prema kriterijima IPCC-a samo CH₄ nastaje izgaranjem goriva, a u 2016. godini je za cijelu hrvatsku flotu M1 maseni omjer iznosio CO₂ : CH₄ = 8300 : 1. Dakle, utjecaj CH₄ na ukupne emisije stakleničkih plinova (CO₂, CH₄ i N₂O) i na potrošnju goriva je zanemariv. Vidi i potpoglavlje 4.2.

Tablica 3.2. Profil prosječnih vozila flote M1 po vrstama goriva
u razdoblju od 2007. do 2016. godine

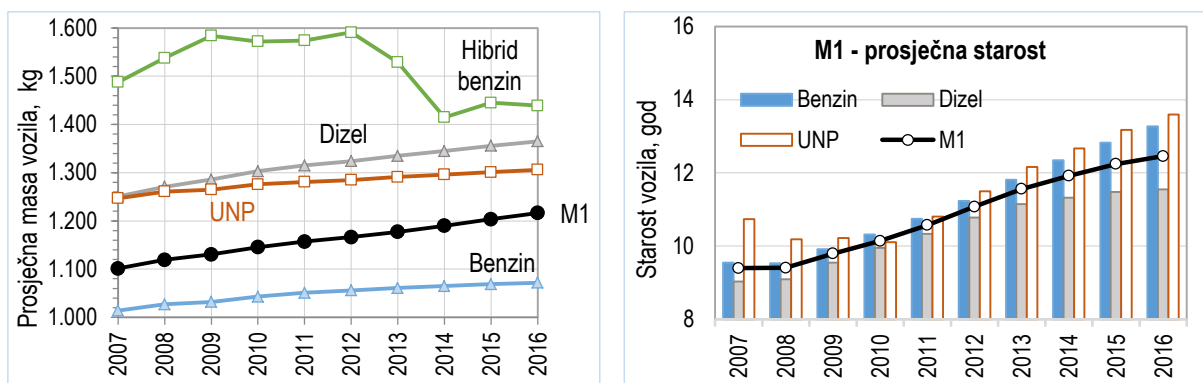
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Broj vozila M1	Benzin	858.456	876.927	869.585	858.184	850.434	833.518	816.570	797.744	782.588	772.529
	Dizel	476.274	499.560	509.708	516.427	531.788	543.428	564.796	604.859	652.271	713.916
	UNP	24.574	37.674	46.982	50.873	50.561	51.296	52.379	53.442	56.124	59.294
	Ukupno MSUI	1.359.304	1.414.161	1.426.275	1.425.484	1.432.783	1.428.242	1.433.745	1.456.045	1.490.983	1.545.739
	Hibrid benz.	70	119	177	215	281	366	462	877	1.359	1.857
	Ukupno	1.359.374	1.414.280	1.426.452	1.425.699	1.433.064	1.428.608	1.434.207	1.456.922	1.492.342	1.547.596
Prosječna starost [god]	Benzin	9,5	9,5	9,9	10,3	10,7	11,2	11,8	12,3	12,8	13,3
	Dizel	9,0	9,1	9,5	9,9	10,3	10,8	11,1	11,3	11,5	11,5
	UNP	10,7	10,2	10,2	10,1	10,8	11,5	12,2	12,7	13,2	13,6
	Hibrid benz.	0,9	1,2	1,9	2,7	3,2	3,5	3,7	2,7	2,7	3,0
	Ukupno	9,4	9,4	9,8	10,1	10,6	11,1	11,6	11,9	12,2	12,5
Prosječna masa [kg]	Benzin	1.014	1.027	1.032	1.043	1.051	1.056	1.061	1.065	1.069	1.072
	Dizel	1.251	1.271	1.286	1.303	1.315	1.324	1.335	1.345	1.356	1.365
	UNP	1.247	1.261	1.265	1.276	1.281	1.285	1.291	1.296	1.301	1.306
	Ukupno MSUI	1.101	1.119	1.130	1.146	1.157	1.166	1.177	1.190	1.203	1.216
	Hibrid benz.	1.488	1.538	1.584	1.572	1.574	1.591	1.529	1.415	1.445	1.439
	Ukupno	1.101	1.119	1.131	1.146	1.157	1.166	1.177	1.190	1.204	1.217
Prosječan radni obujam motora [cm ³]	Benzin	1.401	1.404	1.402	1.403	1.405	1.403	1.402	1.398	1.396	1.392
	Dizel	1.877	1.884	1.889	1.892	1.893	1.895	1.892	1.883	1.877	1.867
	UNP	1.747	1.731	1.718	1.706	1.706	1.707	1.710	1.710	1.711	1.716
	Ukupno MSUI	1.574	1.582	1.586	1.591	1.597	1.601	1.606	1.611	1.618	1.624
	Hibrid benz.	1.819	2.075	2.101	2.083	2.100	2.120	2.038	1.869	1.874	1.868
	Ukupno	1.574	1.582	1.587	1.591	1.597	1.601	1.606	1.611	1.619	1.624
Prosječna snaga motora [kW]	Benzin	57,1	58,1	58,4	59,2	59,9	60,3	60,7	61,0	61,4	61,8
	Dizel	64,2	66,2	67,9	69,7	71,0	72,0	73,4	74,8	76,0	78,0
	UNP	75,0	76,1	76,3	76,8	77,2	77,6	78,3	79,0	79,7	80,8
	Ukupno MSUI	59,9	61,4	62,4	63,6	64,6	65,4	66,4	67,4	68,5	70,0
	Hibrid benz.	77,5	94,9	94,4	94,5	96,0	99,6	92,8	82,7	85,1	85,3
	Ukupno	59,9	61,4	62,4	63,6	64,6	65,4	66,4	67,4	68,5	70,0
Prosječan godišnji put vozila [km]	Benzin	15.190	13.742	12.951	12.692	12.259	11.531	10.777	10.459	10.058	10.201
	Dizel	22.362	20.385	19.402	18.804	19.143	18.074	17.346	16.854	17.234	16.952
	UNP	24.987	22.032	21.443	19.947	19.028	17.894	17.010	16.549	16.804	18.077
	Ukupno MSUI	17.880	16.310	15.536	15.165	15.053	14.249	13.593	13.339	13.452	13.621
	Hibrid benz.	24.249	17.767	23.592	19.040	21.845	29.459	33.577	32.191	17.655	21.391
	Ukupno	17.880	16.305	15.530	15.172	15.060	14.257	13.601	13.347	13.444	13.624
Prosječna emisija CO ₂ [g/km]	Benzin	186	186	185	185	185	185	185	185	185	185
	Dizel	182	181	181	180	180	180	179	179	178	177
	UNP	159	159	159	159	159	159	159	159	159	160
	Ukupno MSUI	183,96	183,46	182,97	182,33	182,40	182,09	181,69	181,25	180,53	180,32
	Hibrid benz.	128	128	129	129	128	128	127	127	128	127
	Ukupno	183,95	183,45	182,97	182,32	182,39	182,08	181,67	181,22	180,49	180,25
Prosječna potrošnja goriva L/(100 km)	Benzin	8,02	8,02	8,00	7,97	7,99	7,98	7,96	7,96	7,96	7,95
	Dizel	6,93	6,91	6,90	6,88	6,87	6,85	6,84	6,82	6,78	6,77
	UNP (ekvivalent benzina, L)	6,85	6,85	6,86	6,86	6,86	6,87	6,87	6,87	6,87	6,88
	Ukupno MSUI	7,62	7,59	7,57	7,54	7,53	7,51	7,48	7,45	7,40	7,37
	Hibrid benz.	5,51	5,52	5,57	5,54	5,53	5,51	5,49	5,47	5,50	5,49
	Ukupno	7,61	7,59	7,57	7,54	7,53	7,51	7,48	7,44	7,39	7,36

Ukupno MSUI – vozila pogonjena isključivo motorima s unutarnjim izgaranjem (Benzin + Dizel + UNP).

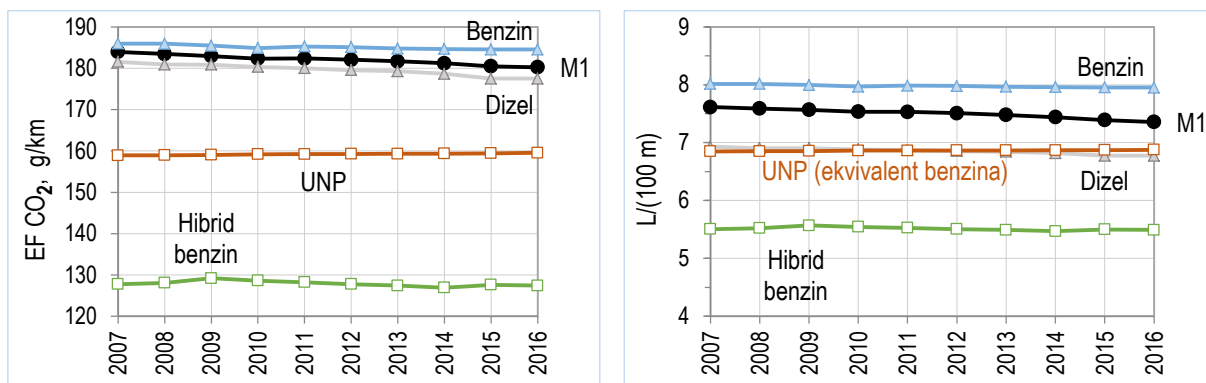


Slika 3.24. Prosječna vozila flote M1 prema vrstama goriva:
snaga i radni obujam motora

Na prvi pogled začuđuje struktura flote, pokazana slikom 3.24. i tablicom 3.2., prema kojoj najveću prosječnu snagu imaju motori na UNP, a najveći radni obujam Diesellovi motori. Međutim, za to postoji logično objašnjenje. Motori na UNP su upravo zato i pregrađeni na plin, jer imaju najveću nominalnu snagu, pa kod pogona benzinom troše puno goriva. Osim troškova goriva, kod pogona plinom im je u izvjesnoj mjeri smanjena i stvarna snaga. Ta vozila imaju i najvišu prosječnu starost (slika 3.25.), ali im udio u floti (slika 3.2.), a i starost, stalno pomalo rastu. Diesellovi motori imaju veći radni obujam a manju nominalnu snagu, u usporedbi s motorima na UNP. Razlog ponajviše leži u tome što se automobili sa Diesellovim motorom kupuju prvenstveno zbog smanjenja troškova goriva (premda su pogonski troškovi niži kod pogona UNP-om), pa velik broj njih čine starija vozila s motorima bez turbopunjača zbog čega im je nominalna specifična snaga (kW/dm^3) manja od Ottovih motorom pogonjenih UNP-om koji su izvorno bili klasični Ottovi motori. Posljednju skupinu čine automobili s Ottovim motorima koji su u pravilu jeftiniji od onih s Diesellovim motorima i očigledno je da su najbrojniji upravo oni s motorima najmanjeg radnog obujma i najmanjih snaga. Povećanje snage, uz nepromijenjen radni obujam (uočava se usporedbom lijevog i desnog dijagrama na slici 3.24.), rezultat je tehničkog razvoja.

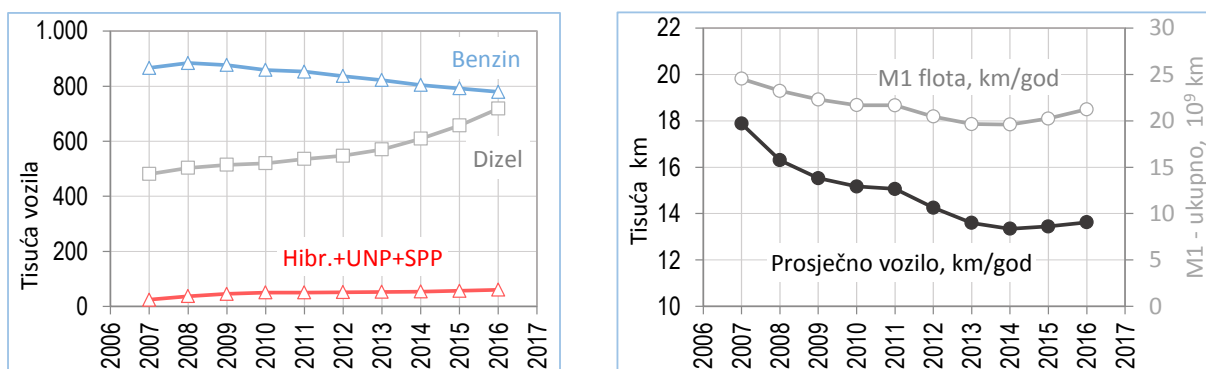


Slika 3.25. Prosječna vozila flote M1 prema vrstama goriva:
masa vozila i prosječna starost



Slika 3.26. Prosječna vozila flote M1 prema vrstama goriva:
emisije CO₂ i potrošnja goriva (kod UNP izražena ekvivalentom benzina)

Iznenaduje da u deset godina gotovo da nema smanjenja potrošnje goriva (sl. 3.26.). Djelomično objašnjenje daje dijagram na prethodnoj slici 3.25.: prosječna starost flote vozila porasla je u istom razdoblju za 33 %, od 9,4 na 12,5 godina. Iz toga se može zaključiti da se tehnološka razina pogonskog sustava vozila tek neznatno promijenila, uglavnom u pogledu pročišćavanja ispušnih plinova, dok je iskoristivost goriva, a time i potrošnja, ostala na istoj razini. Dijagrami na slici 3.26. također pokazuju da se primjenom klasičnih pogonskih sustava s MSUI ne može postići značajnije smanjenje emisija CO₂. Jedino hibridna električna vozila imaju značajno manji emisijski faktor $EFCO_2$. To dovodi do zaključka da tehnološki starija vozila ne mogu donijeti smanjenje potrošnje. U scenarijskoj analizi u 5. poglavlju pokazano je kakve bi to posljedice moglo imati u pogledu ispunjavanja obveza o smanjenju emisija stakleničkih plinova do 2030. godine. Detaljnom analizom pokazanih rezultata može se doći do interesantnih podataka i zaključaka koji na prvi pogled i nisu jasno uočljivi. Jedan takav je pokazan na slici 3.27. Što je veći udio automobili sa Dieslovim motorom, to je kraći prosječan godišnji put vozila. Ovaj rezultat se može objasniti time što ukupan broj osobnih automobila (1,558 milijuna u 2016.) stalno raste u odnosu na broj domaćinstava (1,519 milijuna u 2011.¹⁶), pa relativno veliki broj njih ima najmanje dva automobila zbog putovanja na posao. U tom slučaju je prosječan godišnji put svakog od ta dva automobila manji nego kod domaćinstva koje upotrebljava samo jedan automobil.



Slika 3.27. Porast broja automobila sa Dieslovim motorom i opadanje prosječnog godišnjeg puta flote M1

¹⁶ Hrvatska u brojkama 2017. Državni zavod za statistiku RH, https://www.dzs.hr/Hrv_Eng/CroInFig/croinfig_2017.pdf

4. MODELIRANJE EMISIJA FLOTE VOZILA

Prema *Smjernicama za nacionalne inventare emisija stakleničkih plinova, Međuvladinog panela za promjenu klime*, iz 2006. godine [61], emisijski modeli podijeljeni su prema razini pristupa u tri skupine za koje je u međunarodnoj znanstvenoj zajednici prihvaćen engleski naziv *Tier 1*, *Tier 2* i *Tier 3*. Zbog još neustaljenog hrvatskog nazivlja, a i zbog lakšeg snalaženja i prepoznatljivosti u citiranim izvorima, ovdje se primjenjuju engleski nazivi i izvorne oznake.¹⁷

U modelima **Tier 1** emisija *Emission* [kg] svakog pojedinog onečišćivača računa se na temelju utrošenog goriva *Fuel* [TJ] izraženog kroz količinu sadržane energije i emisijskih faktora *EF* [kg/TJ] za svaku vrstu goriva *a* (benzin, dizel, UNP, SPP, ...):

$$Emission = \sum_a (Fuel_a \cdot EF_a) \quad (4.1)$$

U emisijski faktor za CO₂ uračunava se sav ugljik u gorivu, uključujući onaj sadržan u emisijama CO₂, CH₄, CO, NMVOC i u česticama (PM). U ovo se ne ubraja ugljik iz biogoriva. Model *Tier 1* upotrebljava se ako ne postoje nikakvi drugi podaci osim onih o utrošenom, odnosno prodanom gorivu.

Emisije CO₂ iz katalitičkih konvertora sustava na bazi ureje¹⁸ prema preporukama *dobre prakse* (*good practice*) trebaju se računati prema izrazu:

$$Emission = Activity \cdot \frac{12}{60} \cdot Purity \cdot \frac{12}{60} \quad (4.2)$$

gdje su: *Emission* emisije [Gg CO₂]; *Activity* - količina aditiva na bazi ureje potrošena u katalitičkim konvertorima [Gg]; *Purity* - maseni udio ureje u aditivima na bazi ureje.

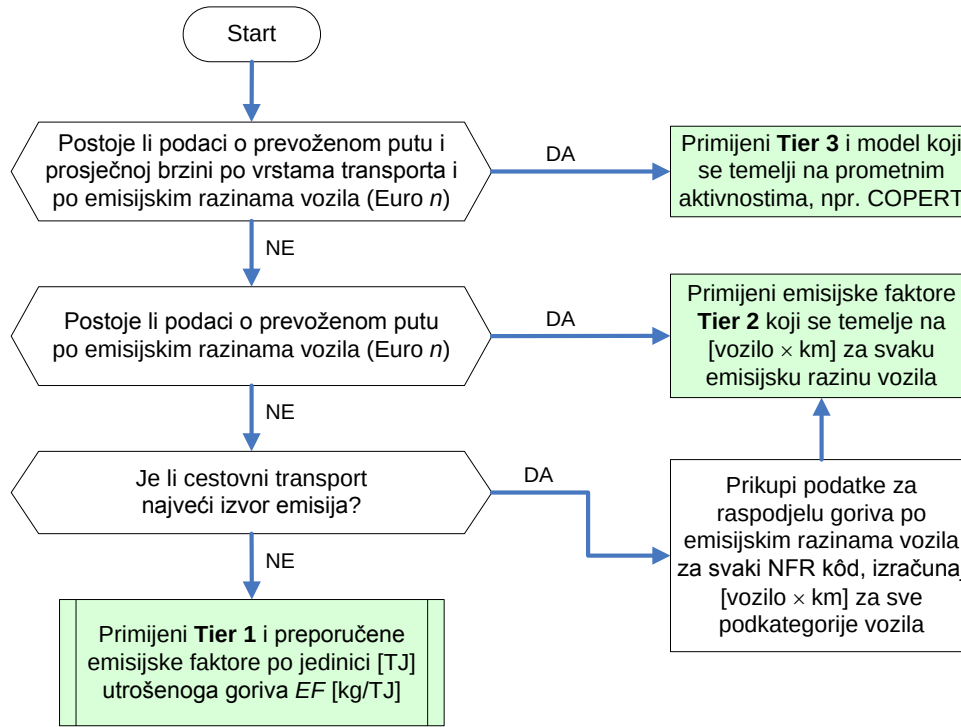
U modelu **Tier 2** emisije se računaju na isti način kao u modelu Tier 1, ali na temelju goriva prodanog u sektoru cestovnog transporta. U odnosu na prethodni model uzima se u obzir još

¹⁷ Engleska riječ "tier" prevodi se u njemačkom jeziku kao: Reihe (red), Stufe (stupanj, faza, ...), Etage (kat), Rang (rang, poredak), (<https://dict.leo.org/german-english/tier>). Kontekstni višejezični online rječnik Glosbe nudi hrvatske prijevode red, razina i kategorija (<https://hr.glosbe.com/en/hr/tier>), a Ministarstvo zaštite okoliša i prirode upotrebljava prijevod „pristup“ (http://www.mzoip.hr/doc/vaznost_pristupa_3_primijenjenog_u_hrvatskom_izvjestavanju_prema_kp.pdf, (2017-10-23).

¹⁸ Sustav SCR (od engl. Selective Catalytic Reduction) troši otopinu ureje u vodi (trgovački naziv adblue).

i kategorija vozila b , kao i tehnološka razina uređaja za pročišćavanje ispušnih plinova c (Euro 0, ..., Euro 6):

$$Emission = \sum_{a,b,c} (Fuel_{a,b,c} \cdot EF_{a,b,c}) \quad (4.3)$$



Slika 4.1. Stablo odlučivanja i odabira razine emisijskog modela prema.¹⁹

Najobuhvatniji model **Tier 3** primjenjuje se ako postoje detaljni statistički podaci o broju vozila u pojedinim emisijskim kategorijama, podaci o prevoženom putu, o uvjetima eksploatacije vozila d (npr. gradska ili izvangradska prometnica, meteorološki uvjeti, drugi uvjeti vezani uz prometnice i okoliš) i o utrošenom gorivu. Emisije se sastoje od dva dijela. Prvi i glavni dio čine emisije u vožnji vozila zagrijanog na pogonsku temperaturu, a računaju se u ovisnosti o duljini prevoženoga puta $Distance$ [km], pri čemu su emisijski faktori definirani po kilometru puta EF [kg/km]. Drugi dio su emisije u fazi zagrijavanja vozila C [kg], odnosno od početka hladnoga starta. Uz primjenu ovih oznaka izraz za emisije glasi:

$$Emission = \sum_{a,b,c,d} (Distance_{a,b,c,d} \cdot EF_{a,b,c,d}) + \sum_{a,b,c,d} (C_{a,b,c,d}) \quad (4.4)$$

Dodatno pojašnjenje daje EMEP/EEA²⁰ *guidebook 2016* [62], u kome stoji da se u modelu **Tier 3** ukupne emisije E_{total} cestovnog transporta, s gledišta toplinskog stanja vozila, sastoje od emisija zagrijanog vozila E_{hot} i emisija vozila u fazi zagrijavanja E_{cold} :

$$E_{total} = E_{hot} + E_{cold} \quad (4.5)$$

a s gledišta vrste prometnica ukupne emisije se sastoje od emisija u gradskoj vožnji E_{urban} , emisija u izvangradskoj vožnji E_{rural} i emisija na autocesti $E_{highway}$:

¹⁹ NFR kod – oznaka izvora emisija prema popisu Nomenclature for Reporting. Za cestovna vozila popis je u [62].

²⁰ EMEP – The European Monitoring and Evaluation Programme, www.emep.int/
EEA – European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/>

$$E_{\text{total}} = E_{\text{urban}} + E_{\text{rural}} + E_{\text{highway}} \quad (4.6)$$

Nakon prve iteracije izračuna emisija po modelu Tier 3 provode se korekcije prema kriteriju **ravnoteže energija**: energija utrošenoga goriva mora biti jednaka energiji goriva prodanog sektoru cestovnog transporta.

U većini država cestovni transport je najveći izvor emisija. Kod izbora modela primjenjuju se u Smjernicama [61] preporučena stabla odlučivanja, posebno za svaki od onečišćivača, a ishod izbora (Tier 1, 2 ili 3) ovisi o dostupnim podacima i ne mora biti za sve onečišćivače isti. Ako postoje potrebni statistički podaci, prednost se daje modelima Tier 3 [62]. Hrvatska je u tom pogledu u naročito povoljnom položaju jer od 2007., u okviru podataka koji se prikupljaju na tehničkim pregledima vozila, Centar za vozila Hrvatske bilježi i stanje putomjera pa je ta baza podataka, u tom pogledu, jedna od točnijih u Europi.

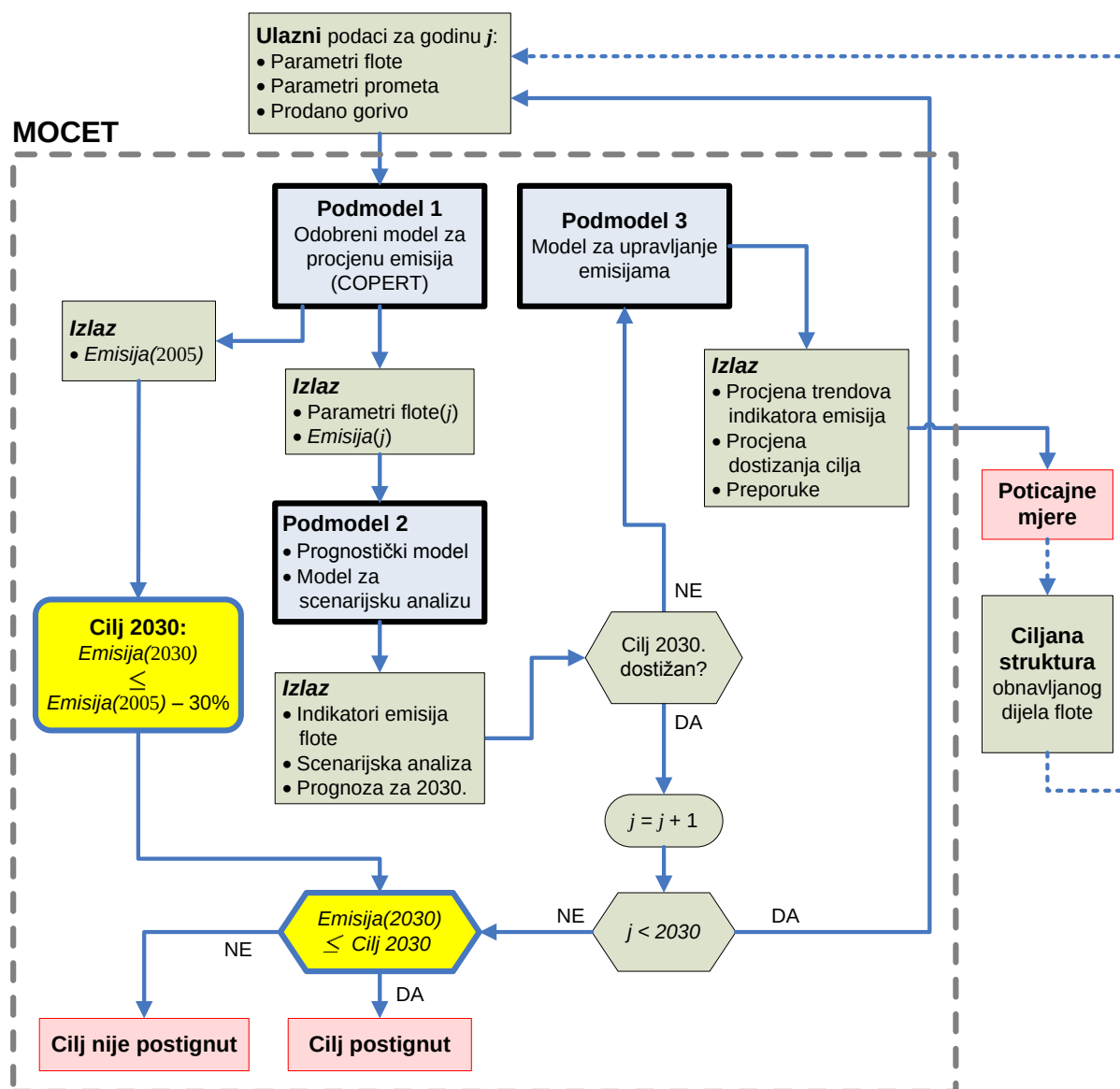
Prije nego što se u modelima primijene **podaci o prodanom gorivu**, u Smjernicama [61], str. 3.25, preporuča se u okviru **dobre prakse** (*good practice*), kao minimum, provjera sljedećih točaka:

- Odnose li se podaci o gorivu samo na cestovna vozila ili uključuju i necestovna? Važno je osigurati da se iz podataka o gorivu isključi gorivo upotrijebljeno za necestovna vozila i strojeve.
- Je li gorivo prodano za cestovni transport potrošeno i za druge svrhe (npr. za grijanje)?
- Kako su evidentirana biogoriva²¹, za koju namjenu?
- Kako su evidentirane mješavine goriva? Evidencija odobrenih mješavina (npr. 25 % etanola u benzinu) je jednostavna. Ali što je s gorivima koja se troše protivno propisima (npr. lož ulje za pogon vozila, benzin potrošen kao otapalo)? Podatke o gorivu treba prilagoditi kako bi se izbjeglo dvostruko evidentiranje.
- Kako na statistiku utječe prekogranična kupovina goriva?
- Postoji li značajnija ilegalna trgovina gorivom?
- Kako je evidentirana potrošnja maziva koje se dodaje benzinu za dvotaktne motore? Ono se može uključiti u goriva za cestovni transport ili evidentirati posebno kao mazivo.

4.1. Model za upravljanje emisijama

S ciljem procjene budućih emisija na razini flote vozila, u okviru izrade ovog doktorskog rada razvijen je **MO**del za upravljanje emisijama **CE**stovnog **T**ransporta **MO**CET, koji se sastoji od tri podmodela (slika 4.2). Prvim podmodelom procjenjuju se emisije u proteklom razdoblju, drugim se prognoziraju buduće emisije prema unaprijed definiranim scenarijima, a trećim se upravlja emisijama pomoću pretpostavljenih modifikacija obnavljanoga dijela flote. Sastav flote može se načelno mijenjati na dva načina. Jedan su poticajne mjere koje će stimulirati kupnju vozila s niskim emisijama, a drugi je povećanje cijena goriva, odnosno druge mjere koje će dovesti do smanjivanja broja registriranih automobila i njihovog korištenja, a to će na kraju opet smanjiti emisije.

²¹ Upotreba biogoriva u Republici Hrvatskoj se već dulji niz godina kontinuirano smanjuje. Udio biodizela u motornim gorivima, jedinog biogoriva na tržištu, iznosio je u 2010. godini 0,1 % [63] (str. 9), a u 2016. 0,04 % [64] (str. 8).

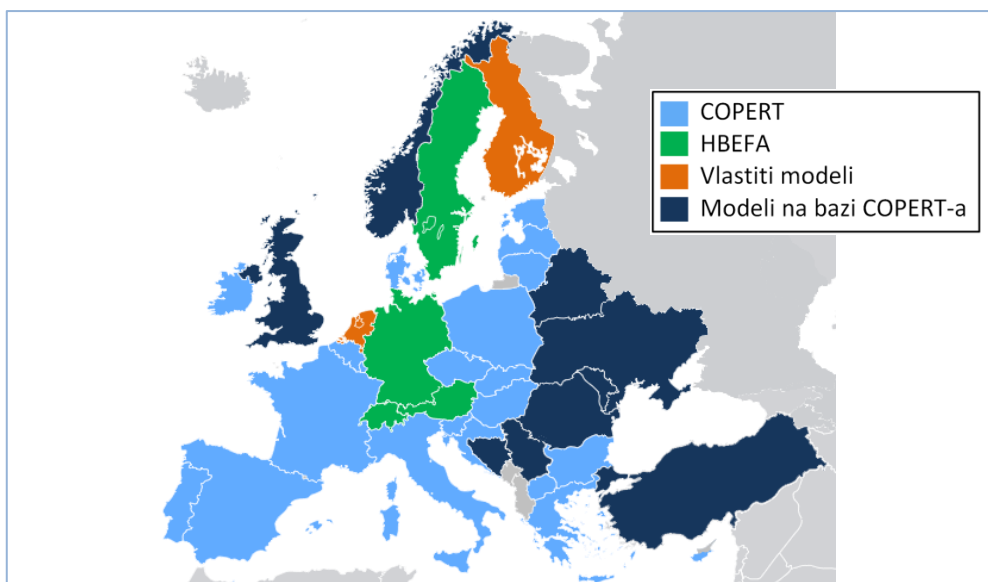


Slika 4.2. Blok shema modela MOCET (početna godina je: j = 2005)

4.1.1. PODMODEL 1: Model za procjenu emisija COPERT 5

Kao prvi podmodel primijenjen je programski poaket COPERT 5. On se u većini europskih zemalja (slika 4.3) primjenjuje kao standardni program za procjenu emisija od cestovnog transporta koji se šalju Eurostatu i institucijama Europske unije nadležnima za praćenje emisija i klimatskih promjena. COPERT spada u modele Tier 3, a koristi emisijske faktore modela HBEFA²².

²² HBEFA - Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. <http://www.hbefa.net/>



Slika 4.3. Pregled primjene modela za procjenu emisija cestovnog transporta u Europi [65]

Vozila kategorije M1 za sada su u programu COPERT 5 podijeljena u 136 emisijskih razreda s obzirom na radni obujam motora, emisijsku razinu vozila (Euro 0, Euro 1, ..., Euro 6), vrstu goriva i vrstu pogonskog sustava (samo motor s unutarnjim izgaranjem ili hibrid). Za svaki od njih treba unijeti broj vozila, godišnji prevoženi put, udio puta na pojedinim vrstama prometnica, prosječnu brzinu vožnje, broj hladnih startova i niz drugih veličina. Program daje sveobuhvatan uvid u emisije cestovnog transporta ali zahtijeva puno rada na pripremi i unosu podataka. Rezultati izračunati modelom COPERT prikazani su u poglavlju 3.

Shema izračuna emisija pomoću modela COPERT 5 pokazana je na slici 4.4. Kako bi se uravnotežila statistička i izračunata potrošnja energije, u programu se primjenjuje automatiziran pristup u dva koraka, slika 4.5. U prvom se izjednačuje omjer količina utrošenih fosilnih i utrošenih biogoriva prema statističkim podacima s omjerom broja vozila koja su pogonjena tim gorivima. Nakon što se to postigne, primjenjuje se druga modifikacija, izmjena kilometraže, i to u obliku korekcijskog faktora, kako bi se postiglo podudaranje s ukupnom statističkom potrošnjom energije. Ove obje ažurirane vrijednosti, količina fosilnih i biogoriva te korigirana kilometraža, koriste se za izračunavanje ukupnih emisija.²³

Proces uravnoteženja energija opisan je na sljedećim izrazima. Uvjet koji treba zadovoljiti jednakost je energija utrošenog goriva *Energy_calculated* na temelju kojeg su izračunate emisije i energije goriva *Energy_sold* prodanog sektoru cestovnog transporta. Za svako gorivo *i* (benzin, dizel, UNP, SPP, ...) izračuna se faktor korekcije MCF_i :²⁴

$$MCF_i = \frac{Energy_calculated_i}{Energy_sold_i} \quad (4.7)$$

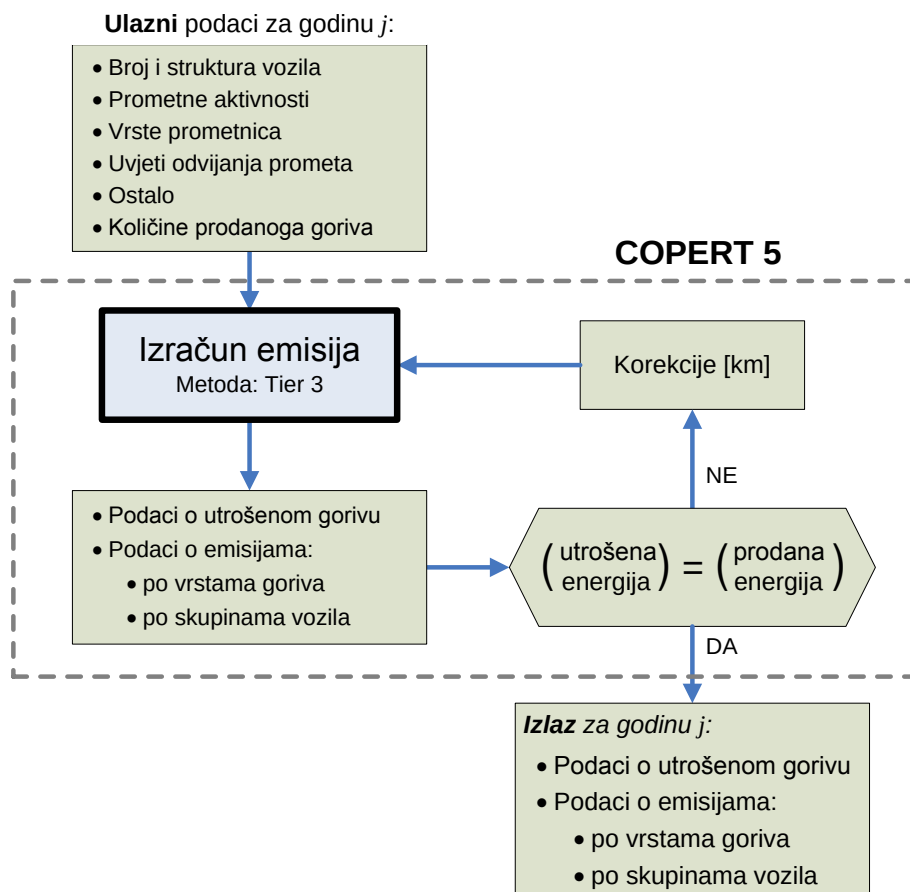
Tim se faktorom računa novi godišnje prevoženi put za svaki emisijski razred *j* vozila:

$$NewMileage_j = MCF_i \cdot Mileage_j \quad (4.8)$$

²³ <http://copert.emisia.com/fuel/statcons/> (2018-07-07)

²⁴ *MCF* – skraćenica engleskog naziva Mileage Correction Factor

Proračun se ponavlja dok se ne postigne vrijednost $MCF_i = 1$, a tek potom se mogu izračunati emisije vozila.

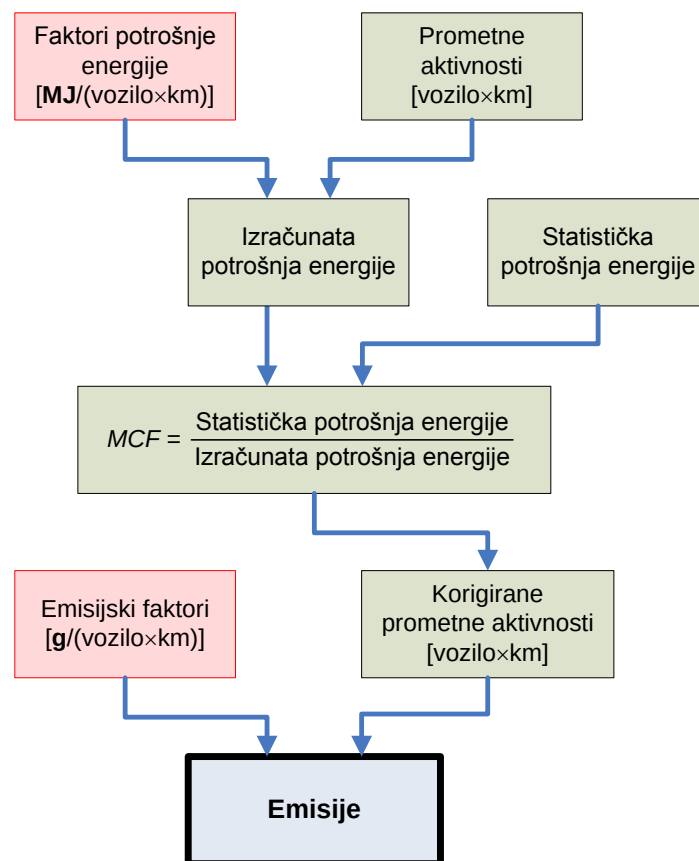


Slika 4.4. Shema izračuna emisija pomoću programskog paketa COPERT 5

Ravnoteža energija

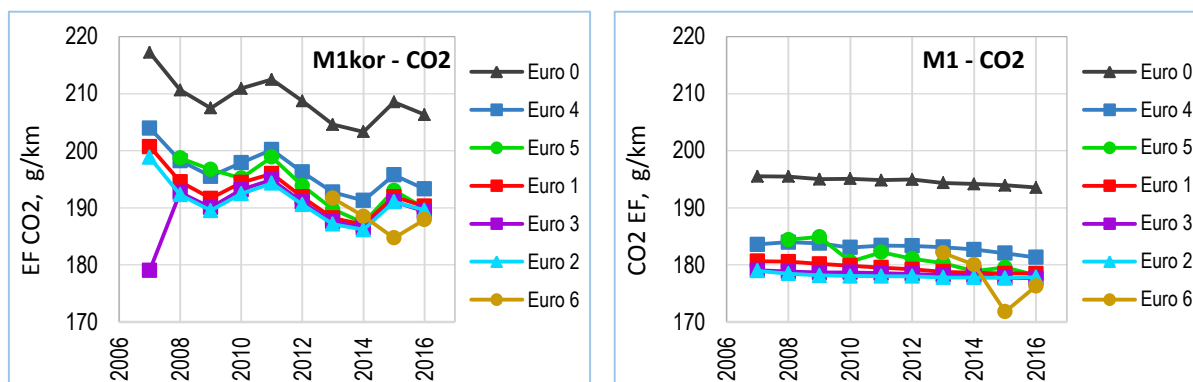
Treba odmah uočiti da je ova korekcija uravnoteženjem energija predviđena zbog toga što vrlo mali broj zemalja²⁵, u koje spada i Hrvatska, raspolaže podacima o godišnjem prevoženom putu svakog pojedinog vozila u floti. U bazama programa COPERT su za svaku državu ti podaci procijenjeni, odnosno izračunati natražno na bazi količina goriva prodanog u cestovnom transportu. Najrazvijenije europske države vode vrlo dobre i precizne zapise o prodaji goriva i oni su bili jedino pouzdano uporište kod procjene emisija transporta. Zbog toga je izjednačavanje energije izračunate na temelju emisija i energije statistički evidentiranoga goriva prodanog sektoru transporta jedini način da se izračunate emisije izjednače sa stvarnima. U Hrvatskoj je situacija upravo obrnuta. Postoje vrlo precizni podaci o prevoženom putu, a statistički podaci o gorivu prodanom pojedinim sektorima cestovnog transporta su prilično nepouzdan.

²⁵ Koliko je poznato, preciznu evidenciju o stanju putomjera, uz Hrvatsku, imaju još Belgija i Nizozemska. U Hrvatskoj se stanje putomjera bilježi od 2007. godine prilikom redovitog godišnjeg tehničkog pregleda koji je preduvjet za registraciju vozila.



Slika 4.5. Ravnoteža energija, izračunata potrošnja energije mora biti jednaka statističkoj, u emisijskim modelima Tier 3 [62]

U programu COPERT je izračun ravnoteže energija automatiziran i ne može se zaobići. COPERT pak primjenjuje emisijske faktore EF [g/km] koji su višestruko provjereni u laboratorijskim uvjetima i u uvjetima realnog transporta i koji se tijekom proteklih godina sustavno i stalno korigiraju te se mogu smatrati vrlo pouzdanima. U ovakvim okolnostima je postupak izračunavanja ponavljan nekoliko puta da bi se nesigurni podaci o energiji goriva prodanog floti M1 prilagodili vrlo sigurnom iznosu energije izračunatom na temelju emisija. Međutim, korekcije prevoženog puta u COPERT-u dovele su do iskrivljavanja dijagrama emisijskih faktora (slika 4.6.). Tako je nastala situacija u kojoj je uspostavljena „ravnoteža“ između spomenuta dva različita iznosa energije i izračunate su „točne“ ukupne emisije, ali su emisijski faktori postali neupotrebljivi za daljnje analize.



Slika 4.6. Korigiran i iskrivljen emisijski faktor (lijevo) i nekorigiran (desno)

U Hrvatskoj, doduše, postoji evidencija prodanoga goriva u cestovnom transportu [63], [64], ali nema evidencije o tome koliko od toga goriva su kupili vozači vozila stranih registarskih oznaka. S obzirom na prolaz i zadržavanje velikog broja takvih vozila, naročito za vrijeme turističke sezone, ovi su podaci krajnje nepouzdana. Također treba istaknuti da za sada ne postoji mogućnost da se kod primjene podataka o prodanom gorivu ispune uvjeti *dobre prakse* navedeni u uvodnom dijelu ovog poglavlja [61].

Zbog svega navedenog u ovom se radu odustalo od uravnoteženja energija.

Tijekom izrade ovog rada emisije su izračunate na oba načina - s korekcijama i bez njih. Kod postignute jednakosti utrošenih energija faktor korekcije MCF_i iznosio je od 0 do 7 %. Procijenjeno je da je netočnost u podacima o prodanom gorivu²⁶ veća od iznosa najvećeg faktora korekcije, pa su u provedenim analizama primijenjeni tehnički logični nekorrigirani podaci. Opravdanost izostavljanja korekcija potvrđuju i rezultati meta analize koju su izradili Smit et al. [25] i u kojoj su pokazali²⁷ da je *faktor pogreške* kod procjene emisija modelima iznosio od 1,3 do 3, a to je do dva reda veličine veće od ovdje primijenjenog, a potom odbačenog faktora korekcije. To nikako ne znači da se ne treba obazirati na COPERT-om predviđenu korekciju s ciljem zadovoljavanja ravnoteže između izračunate/utrošene i prodane energije. Međutim, ako ne postoje dobri podaci o količinama energije prodane sektoru transporta, i ako su drugi utjecajni čimbenici približno jednaki korekcijskom faktoru MCF , a njegova primjena dovodi do nelogičnosti poput ovih pokazanih, tada se i odluka donesena u ovom slučaju treba smatrati ispravnom.

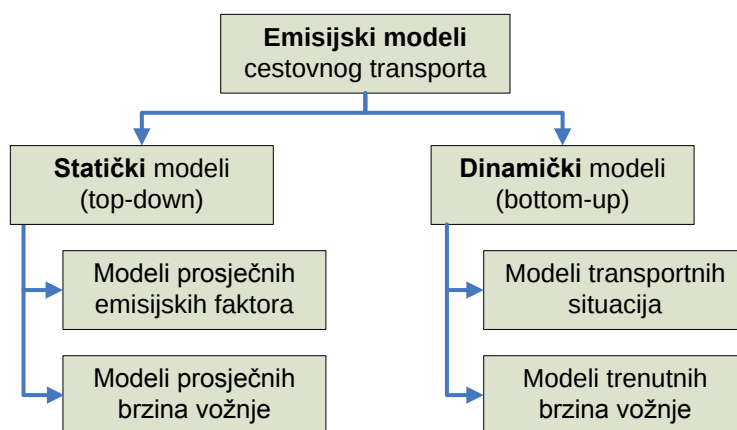
Kad bi se uzela u obzir ravnoteža energija, zbog svih navedenih razloga ne bi se dobila prava slika emisija domaće flote. Ova činjenica je za Nacionalno izvješće o emisijama (NIR²⁸) potpuno nevažno. Međutim, ovdje se radi o istraživačkom znanstvenom radu i za njegovu je vjerodostojnost važno isključiti sve vanjske čimbenike pogrešaka. S obzirom na to da ne postoje potpuno pouzdani podaci o gorivu prodanom floti M1, izostavljanje uravnoteženja energije je nužno da bi se u kontroliranim uvjetima mogla testirati učinkovitost novog modela.

²⁶ Prema podacima u Statističkom ljetopisu Republike Hrvatske 2017 [66], str. 427, u Hrvatskoj je od 2007. do 2016. evidentirano prosječno 10,4 milijuna dolazaka stranih turista godišnje. Uvode se sljedeće pretpostavke: (1) 80 % od toga broja došlo je vlastitim automobilom; (2) svaki turist boravio je prosječno na 1,5 mjesta (turističkih boravišta), što znači da je evidentiran 1,5 puta; (3) jednim automobilom došla su prosječno tri turista; (4) svaki automobil prevalio je u Hrvatskoj udaljenost od 1000 km. Prosječan ukupan broj kilometara koji provoze automobili tih turista u Hrvatskoj iznosi: $10,4 \times 0,8/1,5/3 \times 1000 = 1,85 \times 10^9$ km. U istom razdoblju cijela hrvatska flota M1 provozila je godišnje prosječno $20,04 \times 10^9$ km. Put koji su provozili strani turisti iznosi 9,2 %, toliko iznosi i njihov udio u gorivu koje su kupili u Hrvatskoj, a to je čak malo više od najvećih vrijednosti faktora korekcije MCF . Nažalost nema podataka koliko domaćih turista putuje na odmor u inozemstvo. Međutim, u istom izvoru i na istoj stranici su navedeni brojevi noćenja domaćih i stranih turista. Strani turisti ostvarili su u promatranom razdoblju od osam (u 2005. i 2006.) do dvanaest puta veći broj noćenja (u 2016.). Domaći turisti putuju na odmor u inozemstvo pretežno zimi i njih je zasigurno nekoliko puta manje od onih koji ljetuju na moru. Prema tome, broj automobila hrvatske registracije koji putuju u inozemstvo zasigurno ne prelazi niti jednu dvadesetinu broja automobila stranih registracija koji dolaze u Hrvatsku. Može se zaključiti da je poremećaj koji unose strani turisti veći od netočnosti koja nastaje uslijed izostavljanja ravnoteže energije.

²⁷ Rezultati ovog rada detaljnije su opisani u 2. poglavlju.

²⁸ NIR – skraćenica engleskog naziva National Inventory Report

U analizi [23] koja se bavi pregledom modela za procjenu i nadgledanje emisija u urbanim područjima, s posebnim naglaskom na zemlje u razvoju, međusobno uspoređeni modeli podijeljeni su u dvije skupine: statičke ili *top-down* modele i dinamičke ili *bottom-up* modele (slika 4.7.). U prvu skupinu spada i COPERT pa je zanimljivo na koje njihove prednosti i nedostatke su autori ukazali. Premda se dinamički modeli odlikuju točnošću te pružaju mogućnost modeliranja emisija na složenim tipovima prometnica, kod procjene emisija na razini države oni zahtijevaju krajnje opsežnu pripremu podataka, poput stvarne brzine vozila u ovisnosti o vremenu na svakoj prometnici, kao i puno računalnog vremena. Za razliku od njih, za statičke modele u koje spada i COPERT, dovoljan je znatno manji broj vrlo pojednostavljenih podataka, npr. poput prosječnih brzina vožnje i uprosječenih parametara flote. Zbog toga autori smatraju statičke modele optimalnim izborom za procjenu emisija na većim i velikim geografskim područjima i u situacijama kad su u modeliranju *nužna pojednostavljenja*. Gledano u tom svjetlu, prethodno izložena kompromisna rješenja primijenjena u modelu COPERT mogu se smatrati opravdanim i razumnim.



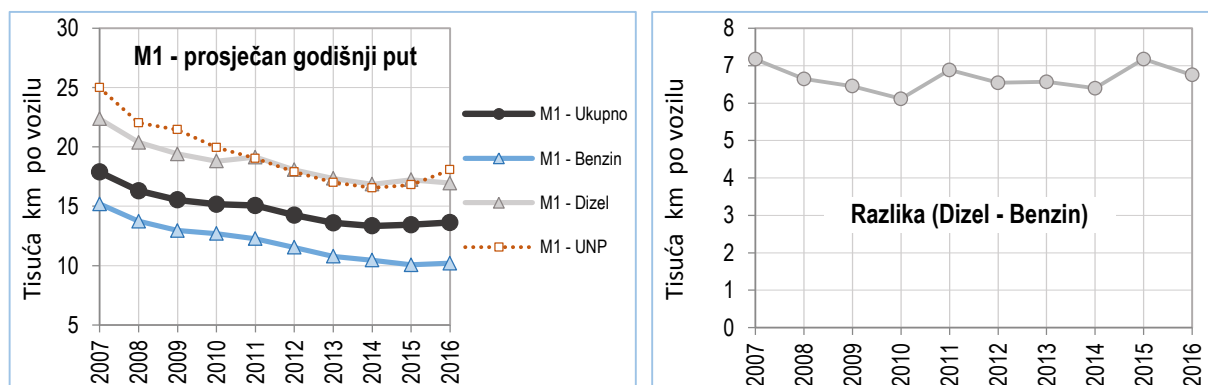
Slika 4.7. Podjela modela na statičke i dinamičke [23]

4.1.2. PODMODEL 2: Prognostički podmodel

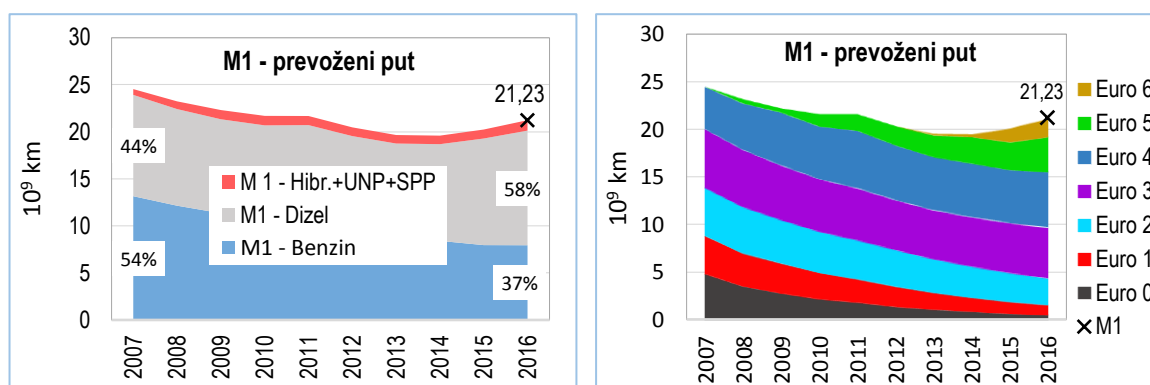
Ovaj podmodel obuhvaća statističku analizu relevantnih parametara flote M1 i prognozu budućih emisija, a namjena mu je scenarijska analiza mogućih ishoda za pretpostavljene uvjete. Prognoze su izrađene na dva načina: primjenom metoda regresijske analize i primjenom teorije vremenskih nizova. Promatrano statistički, svako registrirano vozilo predstavlja jedan događaj, a broj vozila u godini dana jest frekvencija (y_i) tog događaja. Godina (i) u kojoj se to dogodilo jest obilježje događaja, a sve godine zajedno čine diskretnu ili diskontinuiranu slučajnu varijablu (x_i). Brojevi automobila u svim godinama otkako se vodi evidencija čine u statističkom smislu *populaciju*, a brojevi u promatranom razdoblju od deset godina su *uzorak*. Zaključci izvedeni na uzorku preslikavaju se na populaciju.

Emisije flote u budućnosti ovise o tri veličine: **o broju vozila, o prevoženom putu i o emisijskoj razini vozila** (slike 4.8. i 4.9.). Prevožen prosječan godišnji put vozila je približno konstantna veličina koja ponajviše ovisi o starosti vozila, a s njom je pak izravno povezana emisijska razina tj. razina pročišćavanja ispušnih plinova (Euro 0, ..., Euro 6). Promotri li se prosječan godišnje prevoženi put dviju najbrojnijih skupina, M1 – Dizel i M1 – Benzin (slika 4.8.), razvidno je da on od 2007. pokazuje blagi pad do 2014./2015. godine otkada opet vrlo

blago raste. Ono što je sigurno, te krivulje nemaju niti naglih skokova niti oscilacija pa njihova prognoza za jednu do dvije godine unaprijed ne nosi sobom veći rizik. Automobili sa Dieslovim motorom u cijelom promatranom razdoblju prevažuju godišnje ustaljenih šest do sedam tisuća kilometara više od automobila sa Ottovim motorom. Prema tome, najosjetljivijom prognostičkom veličinom ostaje broj vozila u predstojećem razdoblju.



Slika 4.8. Prosječan godišnji prevoženi put po vozilu triju glavnih skupina u floti M1.



Slika 4.9. Ukupan godišnji prevoženi put triju glavnih skupina vozila u floti M1 i prevoženi put pojedinih emisijskih razina

4.1.2.1. Regresijska analiza parametara flote

Regresijskim modelom treba prognozirati vrijednosti $\hat{y}_i$ izvan intervala $i = 1, 2, 3, \dots, n$ poznatih vrijednosti y_i (u ovom je slučaju $n = 10$ godina). Rezultati simulacija pokazali su da su za svaku prognoziranu veličinu potrebne po dvije različite regresijske krivulje. Svaka od njih mora istovremeno zadovoljiti po *dva uvjeta*. *Prvi* je što manje odstupanje od stvarnih točaka, a *drugi* što bolja prilagođenost (što bolji trend) na onom rubu izvan kojega leži prognozirana točka. Onaj *prvi* uvjet traži visoku vrijednost koeficijenta determinacije R^2 . *Drugi* uvjet znači da regresijska krivulja mora dobro pokazivati trend preko granice vremenskog intervala (tj. ispod 2007. ili iznad 2016. godine). Ovo je procjenjivano vizualno, a dodatno je potvrđivano pomoću statističkog paketa *Real Statistics Using Excel*²⁹ koji se integrira u Excel. Osim što računa sve značajnije regresijske pokazatelje za odabrani tip

²⁹ Autor je matematičar dr. sc. Charles Zaiontz, izvanredni profesor na University of South Florida kao i na Cattolica University (u Milanu i u Piacenzi u Italiji) te na St. Xavier College (u Milanu). Adresa stranice je: <http://www.real-statistics.com/>

regresijske funkcije, *Real Statistics* pokazuje i parametre za njenu optimalnu prilagodbu stvarnim podacima.

Koeficijent determinacije R^2 je u nastavku pobliže opisan zbog izuzetne važnosti za procjenu kvalitete prilagodbe.

Uvode se sljedeće oznake i definicije [72, 78]:

y_i - izmjerena vrijednost ili stvarna točka (npr. broj registriranih vozila) u godini i

$\bar{y}$ - aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti (broja registriranih vozila)

$y(x)$ - jednadžba regresijske funkcije kojom se opisuju izmjerene vrijednosti

(u Excelu: krivulje trenda)

x - nezavisna varijabla (kalendarska godina)

$\hat{y}_i$ - točka modela tj. točka na krivulji regresijske funkcije (npr. broja vozila u godini i)

SS_{Total} - ukupan zbroj kvadrata razlika izmjerenih vrijednosti i njihove aritmetičke sredine (SS - Sum of Squares)

$SS_{Residual}$ - ukupan rezidualni zbroj kvadrata razlika točaka modela i stvarnih točaka ili zbroj kvadrata pogrešaka SSE (Sum of Squares of Errors)

$SS_{Explained} = SS_{Regression}$ - ukupan zbroj kvadrata razlika točaka modela i stvarnih točaka objašnjen (regresijskim) modelom.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i) \quad (4.9)$$

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.10)$$

$$SS_{Residual} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4.11)$$

$$SS_{Regression} = SS_{Total} - SS_{Residual} = SS_{Explained} \quad (4.12)$$

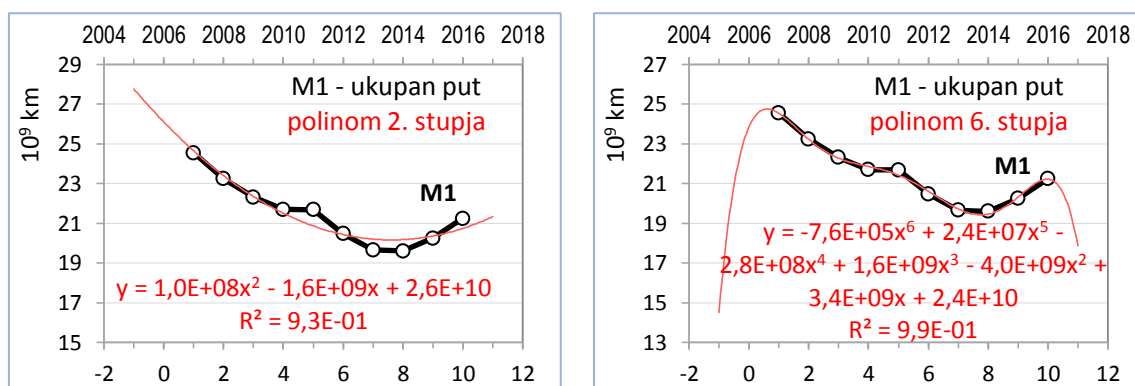
Ako bi regresijska funkcija $\hat{y}(x)$ prolazila svim (izmjerenim/stvarnim) točkama, tada bi rezidualni zbroj kvadrata razlika točaka modela i izmjerenih/stvarnih točaka bio jednak nuli i sve izmjerene/stvarne točke bile bi objašnjene modelom.

Koeficijent determinacije jednak je omjeru (ukupnog zbroja kvadrata razlika točaka modela i izmjerenih/stvarnih točaka objašnjenog modelom) i (ukupnog zbroja kvadrata razlika izmjerenih/stvarnih točaka i njihove aritmetičke sredine):

$$R^2 = \frac{SS_{Explained}}{SS_{Total}} = 1 - \frac{SS_{Residual}}{SS_{Total}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \leq 1 \quad (4.13)$$

Za vrijednost $R^2 = 1$ regresijska funkcija prolazi svim izmjerenim/stvarnim točkama. Međutim, koeficijent determinacije važi samo za *linearnu* regresijsku funkciju. Ako se primjenjuje kod nelinearnih modela, kao što je to u pokazanim primjerima, to može dovesti

do pogrešnih zaključaka. Primijeni li se npr. za regresijsku krivulju umjesto polinoma 3. stupnja polinom 4., 5. ili čak 6. stupnja, R^2 će poprimiti sve veće vrijednosti pa bi sukladno tome trebalo očekivati sve bolju prilagodbu regresijske krivulje stvarnim podacima. Nasuprot tome, s porastom stupnja polinoma, čim izađe iz intervala stvarnih vrijednosti regresijska će krivulja gotovo na njegovim samim granicama poprimiti izrazito velike nagibe te će tako biti potpuno neupotrebljiva za donošenje prognoza izvan granica. Postavljanjem **dodatnog uvjeta o dobroj prilagodbi** (za prvu ocjenu dovoljna je i vizualna procjena) napravljen je zadovoljavajući kompromis između načelno dvojbene upotrebljivosti koeficijenta determinacije u slučaju nelinearnog modela i dobre prilagodbe (nalijeganja krivulje trenda na stvarne točke) na lijevom rubu intervala (lijevo od promatranog intervala se nalazi 2005. godina koju je trebalo rekonstruirati – potpoglavlje 4.1.2.1.2). Uporište za ovo može se naći u radu Spiessa i Neumeyera [67] koji u zaključku navode da je u slučaju nelinearnih prilagodbi „ R^2 rijetko točan na više od tri ili četiri decimale“ (autori su razmatrali primjenu R^2 u farmakologiji i biokemiji, a tamo je to važno npr. za statističko utvrđivanje djelotvornosti lijekova). Spomenuti autori stoga preporučuju za nelinearne modele primjenu *prilagođenog* (*adjusted*) R^2 i druge pokazatelje kvalitete prilagodbe kao što su *AIC* (engl. *Akaike Information Criterion*) i *BIC* (engl. *Bayesian Information Criterion*). U prognozama pokazanim u ovom radu R^2 je izračunat na dvije ili tri decimale, njegove vrijednosti su bile izrazito visoke (iznad 0,98 kod automobila sa Ottovim i Dieselovim motorom koji čine više od 96 % flote M1), a upotrebljavan je uz spomenuti dodatni kriterij pa su rezultati bili više nego dobri. U paketu *Real-Statistics Using Excel* kvaliteta prilagodbe je procjenjivana uz pomoć svih navedenih pokazatelja.

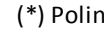


Slika 4.10. Kod nelinearne regresije R^2 ne opisuje dobro kvalitetu prilagodbe. Lijevo: kvadratni polinom, $R^2 = 0,93$, dobra prilagodba (crvena krivulja) stvarnim vrijednostima (crna krivulja) na lijevom rubu promatranog intervala. Desno: polinom 6. stupnja, znatno veći R^2 , ali loša prilagodba na oba ruba intervala.

U tablici 4.1. prikazane su vrijednosti koeficijenta determinacije R^2 , kao pokazatelja kvalitete regresijske prilagodbe emisijskih faktora onečišćivača, za vozila flote M1 pogonjena benzinom. Vidi se da se, ako rasipanje stvarnih točaka nije veliko tj. ako izvorna krivulja (u prvom stupcu) ne oscilira nego je manje-više glatka, može uvijek dobro opisati s barem dva regresijska modela od onih koje nudi Excel. Koeficijent determinacije u takvim je slučajevima u pravilu iznad 0,95, što je svojstveno veoma dobrim regresijskim modelima. S povećanjem stupnja polinoma raste i koeficijent R^2 ali je, kao što je prethodno pokazano, prilagodba

regresijske funkcije na rubovima intervala loša za prognozu izvan granica intervala pa se optimalnim za prognozu u većini slučajeva pokazao polinom trećeg stupnja, a zatim logaritamska funkcija. Zbog toga u tablici nema polinoma četvrtog (osim za CH₄) i viših stupnjeva.

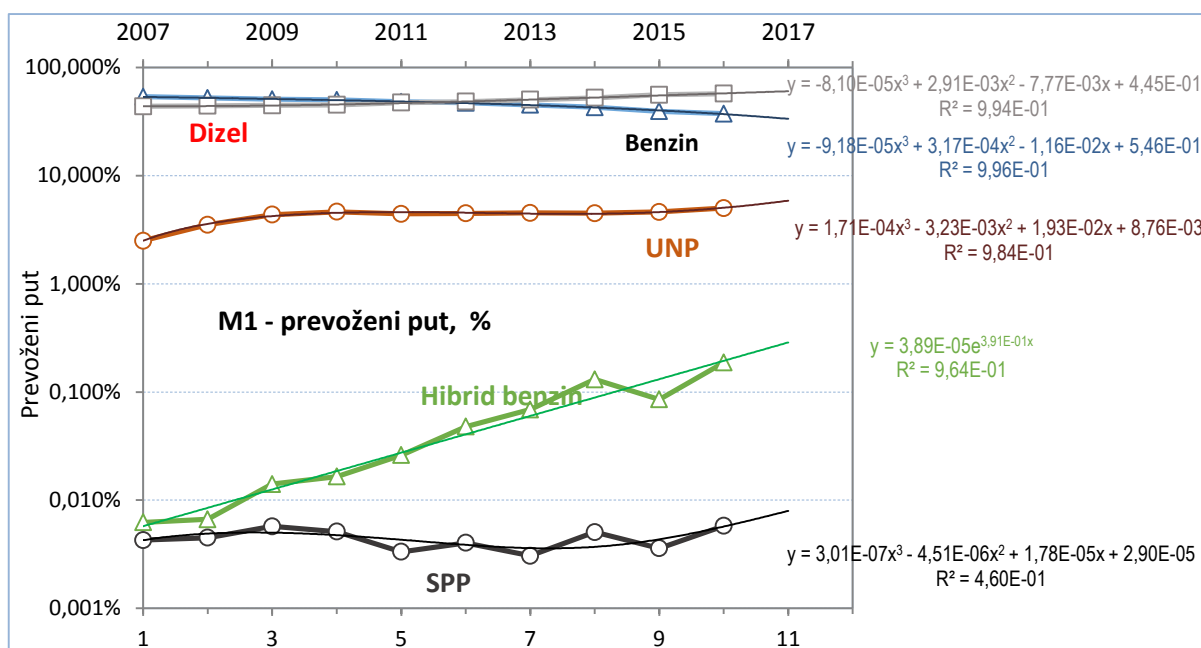
Tablica 4.1. Primjer prilagodbe emisijskih faktora [g/km] vozila M1 pogonjenih benzinom u razdoblju od 2007. do 2016. godine (u prvom stupcu su krivulje stvarnih vrijednosti; obojene ćelije sadrže visoke vrijednosti u retku)

		Koeficijent determinacije R^2 / tip regresijske krivulje						
		Eksponecijalni	Linearni	Logaritamski	Polinom 2. stupnja	Polinom 3. stupnja	Polinom 4. stupnja	Potencija (*)
	CO ₂	0,471	0,4719	0,5941	0,5794	0,5807		0,5901
	NO _x	0,9931	0,954	0,9842	0,9906	0,9931		0,9301
	CO	0,9793	0,9446	0,9749	0,9806	0,9825		0,9402
	PM ₁₀	0,6032	0,6025	0,7143	0,6912	0,6927		0,7106
	PM _{2,5}	0,705	0,7026	0,8025	0,7788	0,7806		0,7989
	VOC	0,9622	0,9224	0,9921	0,9828	0,9898		0,9754
	NMVOC	0,9625	0,9226	0,9914	0,9824	0,9892		0,9742
	NH ₃	0,9525	0,9635	0,8156	0,9829	0,9858		0,7902
	CH ₄	0,9521	0,914	0,9966	0,9844	0,9927	0,9968	0,9859

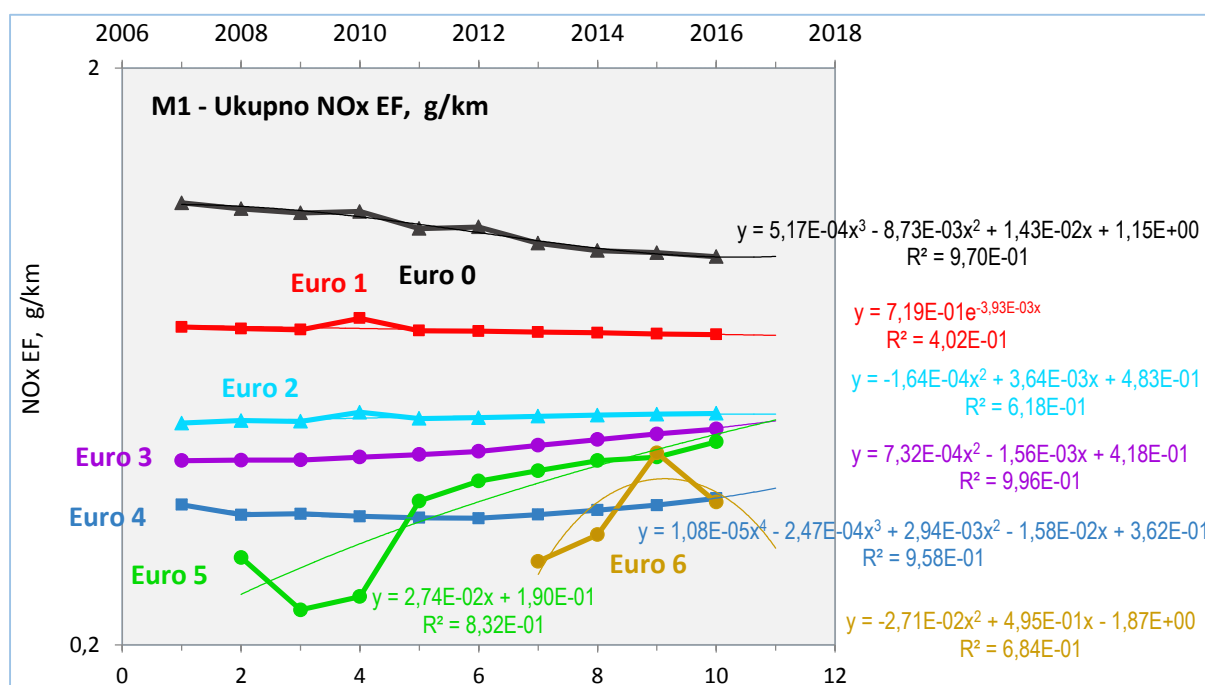
(*) Polinom s decimalnim eksponentima

Alat za regresijsku analizu relevantnih parametara flote sastoji se od jedanaest međusobno povezanih Excelovih datoteka. Prve dvije datoteke sadrže ulazne podatke, prva o emisijama po vrstama goriva i emisijskim razinama (Euro 0, ..., Euro 6), a druga o broju vozila po vrstama goriva i emisijskim razinama. Format ovih datoteka prilagođeni su formatima izlaznih datoteka programskog paketa COPERT 5. U nastavku su pokazani odabrani primjeri.

Na slici 4.11. pokazana je prilagodba nekoliko zavisnih varijabla Y u istom dijagramu. Budući da se njihove vrijednosti razlikuju više od tri reda veličine, odabrano je logaritamsko mjerilo na osi Y da bi se vidjeli detalji u cijelom području. Regresijske krivulje u ovom slučaju su kompromis između što veće vrijednosti koeficijenta determinacije R^2 i što bolje prilagodbe na desnom rubu intervala. Najbolje prilagodbe za tri najveće varijable (benzin, dizel, UNP) dali su polinomi trećeg stupnja, a vrijednosti $R^2 = 0,964$; $0,984$ i $0,996$ potvrđuju visoku kvalitetu regresijskog modela tako da bi se on mogao dobro primijeniti za prognoziranje u 2017. godini. Međutim, kako model ne uključuje vanjske faktore o kojima ovisi količina novca koju će stanovništvo moći odvojiti za nabavku vozila te hoće li vožnja biti nešto više od neophodnog minimuma, prognoza je opterećena nepoznatim rizicima. Za varijablu Hibrid benzin najbolji rezultat dala je ekspanencijska funkcija, uz veoma visoku vrijednost R^2 . Kod varijable SPP se ne može postići bolja prilagodba zbog velikog relativnog rasipanja vrijednosti. Iako se to rasipanje čini malim, ono se događa u području malih vrijednosti gdje je utjecaj rasipanja velik. Zbog toga je uz navedene kriterije prilagodbe najbolji rezultat opet dao polinom trećeg stupnja (polinom 6. stupnja dao je samo malo veću vrijednost: $R^2 = 0,48$).



Slika 4.11. Primjer prilagodbe prevoženog puta vozila flote M1 po vrstama pogonskih goriva



Slika 4.12. Primjer prilagodbe emisijskog faktora vozila flote M1 po emisijskim razinama

U prilagodbi na slici 4.12. većinu najboljih rezultata dao je polinom drugog stupnja. Na varijablama Euro 1 i Euro 2 postoje stršeće točke na $X = 4$ (*outliers*). Njihovom eliminacijom kod Euro 1 R^2 poraste s 0,402 na 0,981, a kod Euro 2 s 0,618 na 0,978. Kod velikog rasipanja s malim brojem točaka (Euro 6) kvalitetna prilagodba nije moguća.

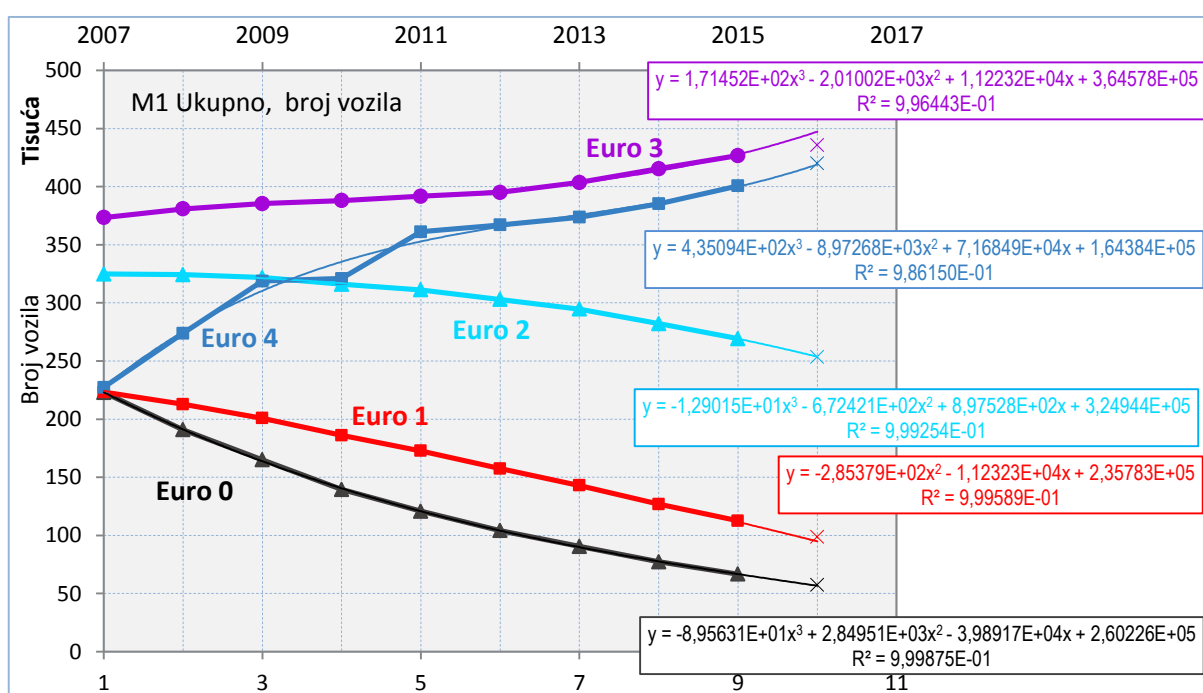
Zaključak:

Za kvalitetnu prilagodbu regresijske krivulje stvarnim rezultatima treba pronaći optimalan kompromis između što veće vrijednosti koeficijenta determinacije R^2 i dobre prilagodbe na onom rubu intervala preko kojega se proteže prognoza. Za nelinearne regresije preporuča se

upotreba prilagođenog koeficijenta determinacije. Kod podataka vezanih uz emisije flote vozila u većini slučajeva najbolje rezultate daje polinom trećeg stupnja.

4.1.2.1.1. Testiranje na povijesnim podacima

Testiranje (slika 4.13.) je provedeno tako da je u setu od deset podataka uzeto prvih devet, pa je regresijskim modelom izračunata prognoza za deseti podatak. Svi primijenjeni polinomi su 3. stupnja, osim za Euro 1 koji je aproksimiran polinomom 2. stupnja. Koeficijent determinacije je 0,99 što navodi na zaključak o vrlo dobroj prilagođenosti polinoma podacima, odnosno o čvrstoj korelaciji. Međutim, načelno loša strana ovih prognoza jest ta što se na temelju povijesne stohastike pokušava predvidjeti buduća stohastika, a to je nepredvidivo.



Slika 4.13. Prognoza broja vozila za poznatu 10. godinu temeljem 9 povijesnih podataka. Podaci su prikazani punim markerima spojenima debelim crtama, regresijske krivulje tankim crtama, a podaci za desetu godinu tankim križićem.

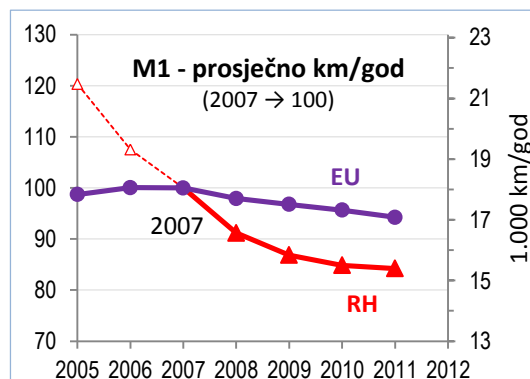
4.1.2.1.2. Rekonstrukcija 2005. godine

Za flotu M1 postoje podaci o broju vozila od 2005. do 2017. godine. Podaci o emisijskoj strukturi vozila i o prevoženom putu postoje za razdoblje od 2007. do 2016. godine³⁰. Podaci za 2005. godinu rekonstruirani su na dva načina:

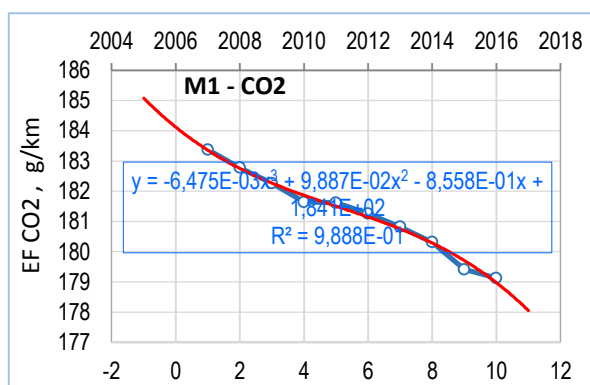
- ekstrapoliranjem do 2005. podataka o prevoženom putu i o emisijama u razdoblju od 2007. do 2016. godine
- prilagodbom podataka o prosječnom godišnje prevoženom putu trendovima u Europskoj uniji

³⁰ U trenutku izrade rada nisu bili dostupni podaci o emisijskoj strukturi vozila i prevoženom putu u 2017.

Ekstrapoliranje do 2005. godine podataka o prevoženom putu i o emisijama u razdoblju od 2007. do 2016. Ovom metodom zadržavaju se trendovi na lijevom rubu intervala poznatih vrijednosti (tj. oko 2007. godine) pa ukupan prevoženi put od 2007. prema 2005. raste. S obzirom na to da istovremeno broj vozila od 2007. prema 2005. opada, prosječan godišnji put vozila u 2005. dostiže sumnjivo visoku vrijednost od 21.518 km (u 2016. godini samo 13.624 km). Budući da s povratkom u prošlost taj trend ne može u nedogled rasti (vidi crtkanu krivulju na slici 4.14.), rezultati ove metode se ne mogu smatrati prihvatljivima.



Slika 4.14. Usporedba indeksa prosječnog godišnjeg prevoženog puta u Hrvatskoj i u Europskoj uniji

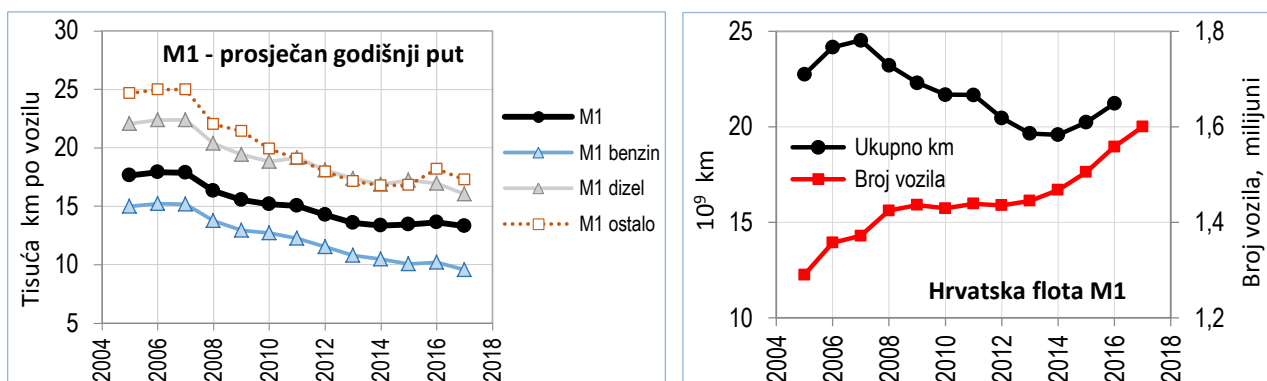


Slika 4.15. Primjer aproksimacije emisijskog faktora polinomom 3. stupnja uz dobru prilagodbu na lijevom i desnom rubu intervala poznatih vrijednosti

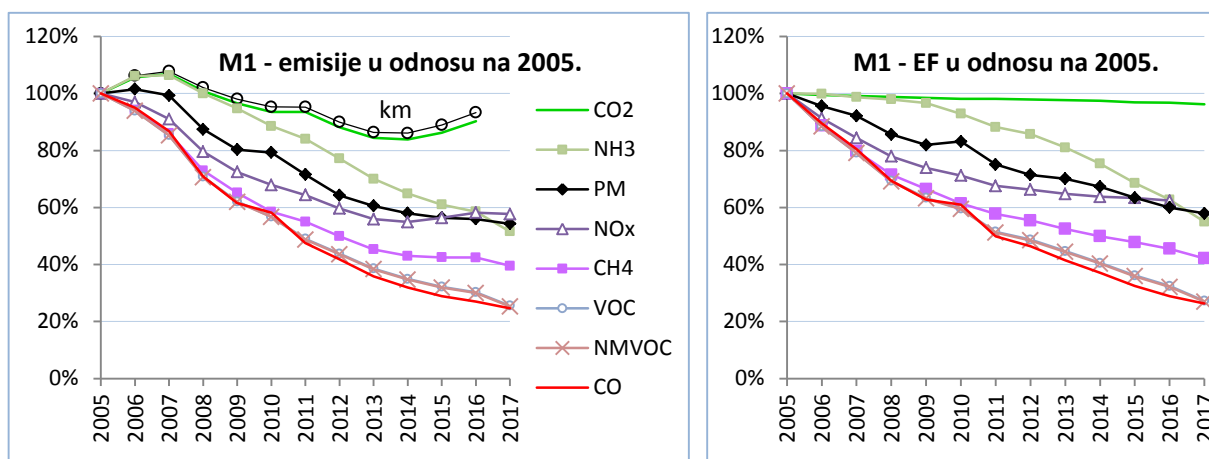
Prilagodba podataka o prosječnom godišnjem prevoženom putu trendovima u EU. Za Hrvatsku podaci o prosječnom godišnjem prevoženom putu postoje tek od 2007. godine. Podatke za 2005. i 2006. godinu trebalo je procijeniti, a jedini indikator koji je za to mogao poslužiti su statistički podaci koje za Europsku uniju kao cjelinu objavljuje Europska agencija za okoliš EEA [68]³¹. U EU je lokalni maksimum godišnjeg prevoženog puta vozila kategorije M1 nastupio u 2006./2007. godini, a isti omjeri u odnosu na 2007. godinu primijenjeni su i na hrvatsku flotu. Na temelju tako određenog prosječnog godišnjeg prevoženog puta vozila izračunat je ukupan prevoženi put u 2006. i 2005. godine (slika 4.16). Krivulje emisijskih

³¹ Podaci se odnose na putničke automobile (engl. cars) i ne sadrže apsolutne brojke nego indekse u odnosu na referentnu godinu. U Europskoj uniji ne postoji zakonska obveza godišnjeg bilježenja stanja putomjera pa su podaci o prosječnom godišnjem prevoženom putu vozila rezultat procjene.

faktora svih onečišćivača hrvatske flote M1 su vrlo glatke pa su aproksimirane regresijskim funkcijama uz koeficijent determinacije $R^2 \geq 0,99$ (slika 4.15.) uz dobru prilagodbu na lijevom i desnom rubu intervala [2007., ..., 2016.] poznatih vrijednosti. Emisije u 2006. i 2005. godini određene su kao produkt emisijskih faktora i ukupnog prevoženog puta (slika 4.17.). Brojčani rezultati su u tablici 4.2.



Slika 4.16. Prosječan godišnji put po vozilu (lijevo) i ukupan godišnji prevoženi put (desno). (Podaci od 2007. do 2016. Prognoza u 2005., 2006. i 2017. godini.)



Slika 4.17. Indeksi ukupnih emisija (lijevo) i emisijskih faktora EF (desno) hrvatske flote M1 (Podaci od 2007. do 2016. Prognoza u 2005., 2006. i 2017. godini.)

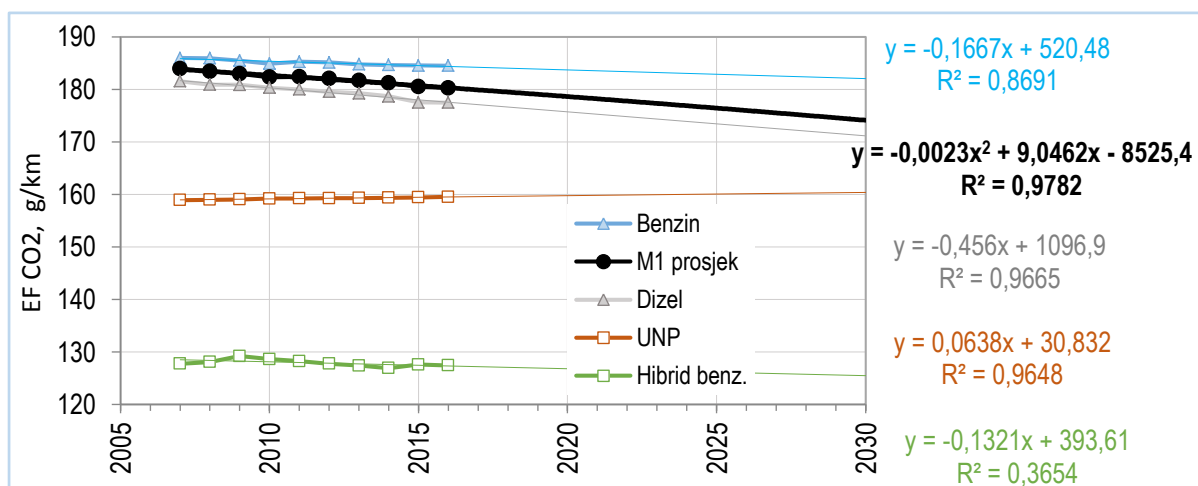
Tablica 4.2. Rekonstruirane i COPERT-om procijenjene emisije od 2005. do 2017. godine.

Emisije [t]	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
CO2	4.210.812	4.449.778	4.498.604	4.245.979	4.065.547	3.939.536	3.936.631	3.710.123	3.554.043	3.532.615	3.630.919	3.803.098	3.797.282
NOx	16.594	16.093	15.102	13.203	12.025	11.267	10.686	9.899	9.282	9.113	9.354	9.662	9.573
NH3	714	758	760	714	676	632	600	551	500	463	436	418	368
PM	2.579	2.618	2.562	2.256	2.072	2.045	1.845	1.658	1.562	1.495	1.455	1.443	1.400
VOC	10.440	9.806	8.915	7.390	6.484	5.927	5.119	4.575	4.029	3.647	3.358	3.163	2.667
NMVOC	9.715	9.120	8.287	6.860	6.014	5.507	4.736	4.233	3.727	3.370	3.102	2.915	2.456
CH4	1.349	1.271	1.160	984	879	789	742	673	611	580	574	573	533
CO	74.575	70.868	64.757	52.836	45.870	43.358	35.441	31.141	26.706	23.824	21.564	20.110	18.364

COPERT 5: od 2007. do 2016. Prognoza: u 2005., 2006. i 2017.

4.1.2.1.3. Projekcija prosječnih emisijskih faktora flote do 2030. godine

Ukupne emisije flote M1 izračunate podmodelom COPERT počivaju na veoma točnim podacima o stanju putomjera koje se bilježi prilikom redovitog godišnjeg tehničkog pregleda vozila. Zbog toga se i podaci o emisijama izračunatim temeljem prevoženog puta izvučenog iz stanja putomjera mogu smatrati izvanredno točnima, u mjeri u kojoj je točan COPERT. Isto važi i za emisijske faktore. Linearni trendovi (pravci na slici 4.18.) prosječnih emisijskih faktora tijekom promatranih deset godina pokazuju izrazito čvrstu korelaciju s podacima, tj. s vrijednostima procijenjenim COPERT-om³² (krivulje s točkama na slici 4.18.). Rezultat ove projekcije je iznenađujući, jer se savršeno poklapa s trendovima u razvoju novih tehnologija u automobilske industriji. Naime, slika 4.18. jasno pokazuje da se značajnije smanjenje emisija stakleničkih plinova može postići samo većom penetracijom novih tehnologija. U ovome trenutku to su hibridna električna vozila. Koeficijent korelacije $R = \sqrt{R^2}$ kod hibrida nema naročito veliku vrijednost (0,60), ali to je zbog malog broja vozila³³. Međutim kod glavnih sastavnica, automobila sa Ottovim i Dieslovim motorom, trendovi pokazuju vrlo čvrstu korelaciju. To jasno ukazuje na to da se emisije CO₂ neće moći smanjiti ako se udio tih vozila u floti značajno ne smanji u korist novih pogonskih sustava s radikalno manjim emisijama.



Slika 4.18. Projekcije emisijskih faktora flote M1 u cjelini i po gorivima do 2030. godine.

Ovaj dijagram se može smatrati najvrjednijim doprinosom prognostičkih modela.

³² S obzirom na to da je COPERT referentni alat za izračun emisija od cestovnog prometa u Hrvatskoj, to su za nas stvarni podaci, jer se upravo ti podaci šalju Eurostat-u i Europskoj agenciji za zaštitu okoliša EEA. Prema tim podacima se mjeri ispunjava li Hrvatska svoje obveze u pogledu smanjenja emisija od cestovnog prometa.

³³ Kad su frekvencije male (broj vozila u statističkom smislu predstavlja frekvenciju), tada i relativno mala rasipanja dovode do relativno velikih oscilacija emisijskog faktora. S povećanjem broja vozila krivulja EF za hibride će se stabilizirati. S obzirom na to da su emisijski faktori kod njih niski, može se očekivati da će se ovaj trend zadržati, samo što će biti pojačan većim koeficijentom korelacije.

4.1.2.2. Metoda vremenskih nizova

4.1.2.2.1. Kratak pregled metode

Tekst potpoglavlja 4.1.2.2.1. preuzet je u skraćenom i neznatno prilagođenom³⁴ obliku iz Lindenovog rada [69]. Da bi se izbjegla opasnost pogrešnog tumačenja formula, te da bi se olakšala usporedba s izvornikom, zadržane su izvorne Lindenove oznake. Glavne razlike u oznakama pokazane su sljedećom tablicom.

Disertacija	Linden [69]	Naziv (u zagradama: engleski ili napomena)
i	t	indeks diskretne varijable (npr. kalendarske godine) u intervalu izmjerenih vrijednosti
i	m	indeks prognozirane diskretne varijable (npr. kalendarske godine) izvan intervala izmjerenih vrijednosti
y_i	X_t	izmjerena vrijednost u stavku Identifikacija (4.1.2.2.1.3. ARIMA modeli)
y_i	Y_t	izmjerena vrijednost (npr. broj registriranih vozila) u godini i
$\hat{y}_i$	L_t	prognozirana vrijednost u intervalu izmjerenih vrijednosti
$\hat{y}_i$	F_{t+m}	prognozirana vrijednost za period $t + m$ kod jednostavnog eksponencijalnog zaglađivanja

4.1.2.2.1.1. Načela analize vremenskih nizova

Vremenski niz se može opisati kao niz rezultata periodički ponavljanih mjerenja. Nezavisna varijabla su vremenske točke³⁵ x_t u kojima su izvršena mjerenja čiji rezultati su zavisna varijabla y_t , odnosno pisano zajedno $y_t(x_t)$. Općenito se analize vremenskih nizova koriste za opisivanje obrazaca ponašanja koji se javljaju u prirodnom okolišu tijekom razdoblja mjerenja, za analize fluktuacije zavisne varijable duž kontinuuma, za donošenje zaključaka o utjecaju intervencije uvedene tijekom razdoblja mjerenja i za prognožiranje budućih kretanja zavisne varijable.

Važna značajka vremenskog niza (serije) je serijska ovisnost. Bilo koja varijabla mjerena tijekom vremena potencijalno je pod utjecajem prethodnih opažanja (autokorelacija). Da bi se iskoristile prednosti ovih odnosa, u modelima vremenskih nizova primjenjuju se prethodna opažanja kao osnova za prognožiranje budućeg ponašanja. Primjena prethodnih opažanja za prognožiranje budućeg ponašanja vremenskih nizova **čini bitnu razliku između analize vremenskih nizova i tradicionalnih statističkih testova za mjerenje promjena, kao što je regresijska analiza** koja se oslanja na varijacije u nezavisnim varijablama da bi se objasnile promjene u ishodu.

Neke metode za analizu vremenskih nizova omogućuju programskom procjenitelju izradu prognoze budućeg ponašanja promatrane varijable bez mjerenja nezavisnih čimbenika koji utječu na to buduće ponašanje. Ovo je iznimno važno, jer postoji mnoštvo čimbenika koji mogu utjecati na ponašanje promatrane varijable vremenskog niza, a koji se ne mogu

³⁴ Od mnoštva pregledanih literaturnih izvora ovo je najbolji rad koji u sažetom i lako razumljivom obliku opisuje analizu vremenskih nizova. Prilagođenost ovog prikaza sastoji se u tome da su izostavljeni ili preinačeni oni dijelovi teksta koji se u objašnjenjima pozivaju na primjere iz područja zdravstvenog menadžmenta.

³⁵ U ovom slučaju to je diskretna ili diskontinuirana nezavisna varijabla.

prepoznati ili točno izmjeriti. Upravo zbog toga se modeli vremenskih nizova sve više primjenjuju za prognoziranje budućeg ponašanja najrazličitijih pojava.

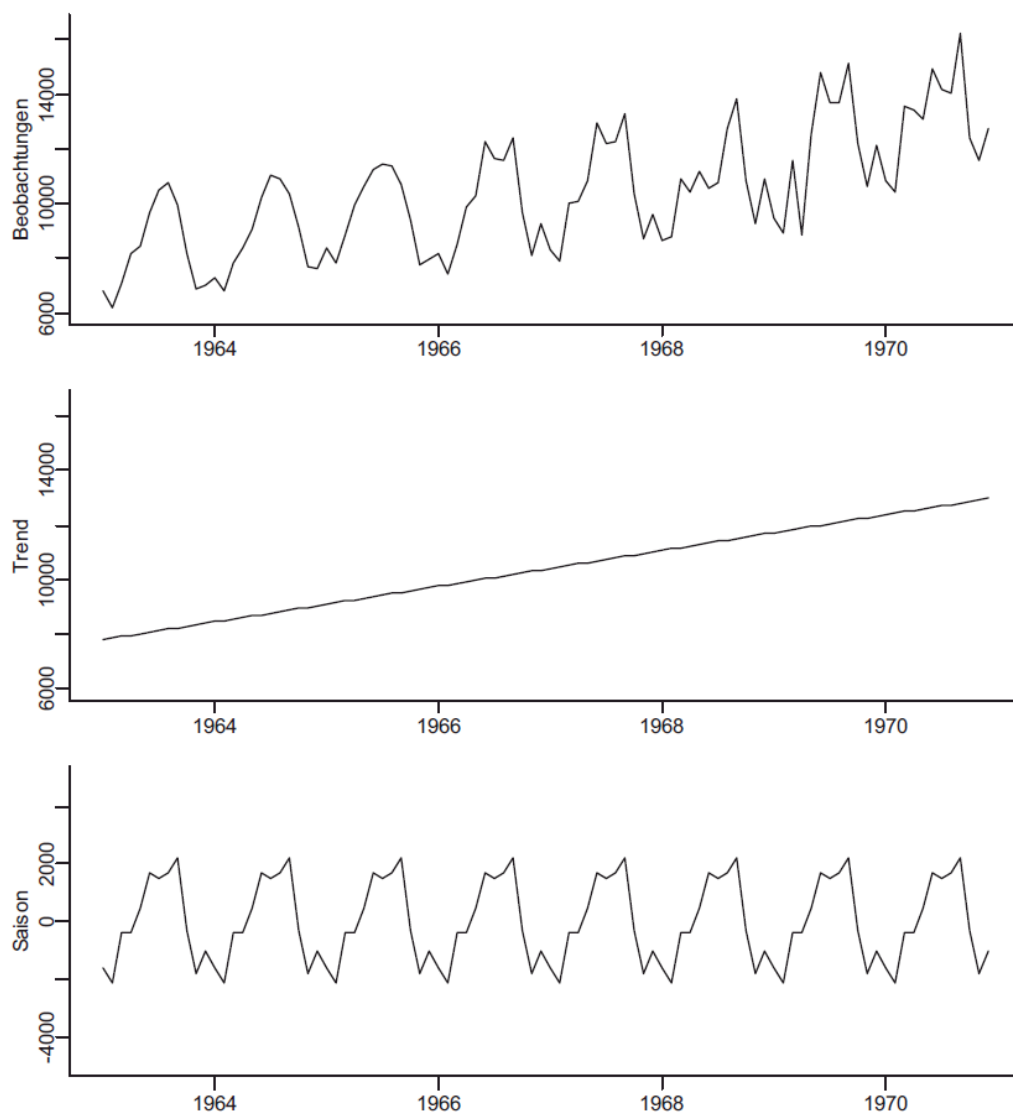
Izrada modela vremenskog niza odvija se u tri osnovna koraka: (1) grafički prikaz podataka pomoću dovoljnog broja opažanja kako bi se identificirali svi obrasci niza koji mogu pomoći evaluatoru da identificira odgovarajući model, (2) odabir ispravnog modela i prilagodba podataka i (3) evaluacija modela usporedbom prognostičkih rezultata sa stvarnim podacima.

Postoji nekoliko mogućih uzoraka koji se mogu prepoznati vizualnim pregledom dijagrama vremenskoga niza:³⁶

1. **Trend.** To je dugoročno kretanje niza podataka koji se može naginjati prema gore ili prema dolje.
2. **Sezonalnost.** Za ovaj uzorak su karakteristični šiljci u redovitim intervalima na dijagramu vremenskoga niza (obično mjesečno, tromjesečno ili godišnje).
3. **Stacionarnost.** Stacionarni vremenski niz sadrži podatke koji imaju konstantnu varijancu oko stalne sredine. Stoga stacionarni niz ne bi imao linearni trend ili sezonsku komponentu, već bi se umjesto toga podaci razmjestili relativno vodoravno duž osi x .

U dijagramu na slici 4.19. pokazan je vremenski niz koji sadrži podatke o broju kilometara koji se mjesečno ostvaruju letovima jedne zrakoplovne kompanije [77]. Ovaj (izvorni) niz može se rastaviti na svoje sastavnice: **trend** (srednji dijagram) i **sezonsku komponentu** (donji dijagram). Trend (u ovom slučaju linearni) pokazuje da s protekom vremena vrijednosti niza rastu. Sezonska komponenta jasno pokazuje ponavljanje uzorka svakih dvanaest mjeseci. Ako bi izvorni niz imao horizontalan trend, tada bi to bio **stacionaran** vremenski niz.

³⁶ Vremenski niz može sadržavati sve ove komponente: trend, cikličku komponentu, sezonsku komponentu i slučajnu komponentu. *Trend* (linearni, polinomni, eksponencijalni, ...) pokazuje dugoročni, osnovni razvoj pojave u vremenu. *Sezonska* komponenta je posljedica periodičnih utjecaja na razvoj pojave (npr. mjesečna ili tjedna proizvodnja, prodaja i sl.). *Ciklička* komponenta pokazuje se kad se vremenska pojava obnavlja na približno isti način s periodom od dvije ili više godina. Kod kratkih vremenskih serija cikličku komponentu je teško identificirati i razlučiti od trenda. Osim ovih „sistemskih komponentata“ na vremenske pojave utječe i *slučajna* (stohastička) komponenta. (Šošić [70], str. 601).



Slika 4.19. Vremenski niz (gore) rastavljen na svoje komponente: trend (u sredini) i sezonsku komponentu (dolje)[20]

U nastavku su pokazane dvije kategorije modela vremenskih nizova: eksponencijalno zaglađivanje i metoda autoregresijskih integriranih pomičnih prosjeka ARIMA (engl. *AutoRegressive Integrated Moving Average*). Proces za izradu najjednostavnijih modela može se izvesti pomoću automatiziranih funkcija koje se nalaze u većini statističkih paketa. Kao rezultat toga, ove su metode prikladne za projekte u kojima treba prognozirati veći broj varijabla. Štoviše, ovi jednostavni modeli ne zahtijevaju teorijsko razumijevanje napredne statistike.

Najkompleksniji modeli uključuju iterativni proces koji zahtijeva razumijevanje temeljnih statističkih pojava, kao i sofisticirane funkcije koje nisu uvijek dostupne u osnovnim statističkim paketima. Slijedom toga, za izgradnju ovih modela potrebno je više vremena, što može ograničiti broj varijabli koje treba prognozirati, a za razvoj modela će biti potreban ekspert za statistiku, odnosno za prognoziranje. Međutim, ti su modeli točniji i svestraniji te omogućuju dodavanje nove neovisne varijable koja pokazuje učinak vanjske intervencije na buduće vrijednosti promatrane zavisne varijable.

4.1.2.2.1.2. Eksponecijalno zaglađivanje

Jednostavno eksponencijalno zaglađivanje *SES* (engl. *Simple Exponential Smoothing*) se primjenjuje kod stacionarnih vremenskih nizova (tj. onih koji nemaju nikakvu sezonsku varijaciju ili sezonski trend). Drugim riječima, prognoza ovog modela je u osnovi jednaka prethodnoj prognozi korigiranoj (zaglađenoj) za iznos prognostičke pogreške (tj. razlike između stvarne i prognozirane vrijednosti). Opći izraz glasi [69]:

$$F_{t+m} = \alpha Y_t + (1 - \alpha)F_t \quad (4.14)$$

gdje je F_{t+m} prognozirana vrijednost³⁷ za period $t + m$ na osnovi podataka³⁸ (tj. stvarnih vrijednosti) Y_t i težinske konstante α (u rasponu od 0 do 1), te vagane prognozirane vrijednosti $(1 - \alpha)F_t$ gdje je $(1 - \alpha)$ ponder. Što je α bliže 1, to je veća korekcija nove prognozirane vrijednosti F_{t+m} u odnosu na prethodno prognoziranu vrijednost F_t . Nasuprot tome, korekcija je to manja što je α bliže nuli. (Za $\alpha = 0$ dobiva se $F_{t+m} = F_t$ što znači da je nova prognostička vrijednost jednaka prethodnoj tj. nema korekcije nove prognostičke vrijednosti u odnosu na prethodnu) [69].

Dvostruko eksponencijalno zaglađivanje *DES* (Double Exponential Smoothing) je razvio Holt kao varijantu jednostrukog zaglađivanja. Naziv *dvostruko* govori da se provodi dvostruko procjenjivanje: procjenjuje se razina (kao u *SES* modelu), ali i trend. Kao i kod *SES* modela, razvoj modela se može provesti iscrpljujućim iterativnim procesom ili se njegovo određivanje može prepustiti nekom od statističkih programskih paketa pomoću tehnike pretraživanja mreže ili optimalizacije. *DES* je prikladan ako u podacima postoji zamjetan trend, ali bez jasne sezonske komponente. Osnovne jednadžbe Holtove metode su [69]:

$$L_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + b_{t-1}) \quad (4.15)$$

$$b_t = \beta(L_{t-1} - L_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (4.16)$$

$$F_{t+m} = L_t + b_t m \quad (4.17)$$

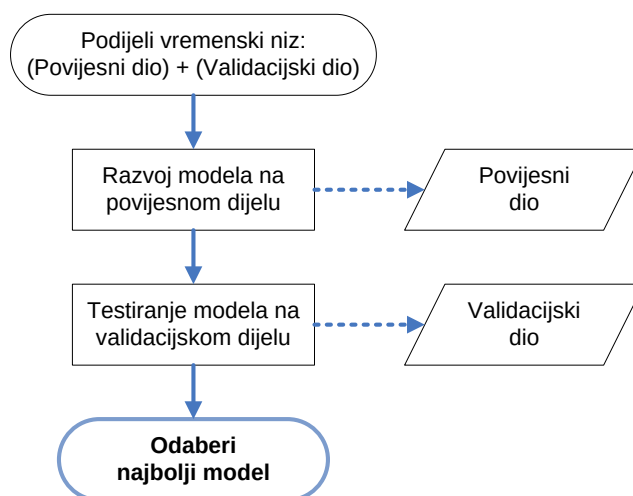
Vidi se da je jednadžba (4.16) slična jednadžbama (4.14) i (4.15) samo što je zaglađivanje napravljeno na trendu, a ne na stvarnim podacima. Trend b_t je pomnožen brojem m budućih perioda za koje će se izraditi prognoza i potom je pribrojen tekućoj vrijednosti podataka L_t . Dakle, jedina značajna razlika između *DES* -a i *SES* -a je dodatna jednadžba za kontrolu trenda[69].

Holt-Winters multiplikativni model s trendom i sezonskom komponentom. Winters je proširio Holtov linearni model eksponencijalnog zaglađivanja uvođenjem dodatne jednadžbe koja uzima u obzir sezonalnost. Model Holt-Winters uključuje varijable koje računaju slučajnost, trend i sezonsku komponentu vremenskog niza. Kao i u prethodnim metodama, preporučuje se da procjenitelj koristi softverski paket kako bi pronašao najpovoljnije parametre modela.

³⁷ Oznaka u ovome radu: $\hat{y}_{i+m}$

³⁸ Oznaka u ovome radu: y_i

Konačan zaključak o eksponencijalnom zaglađivanju: model koji koristi povijesne podatke trebao bi se prilično dobro uklopiti u te podatke (budući da su svi podaci dostupni i da se ne zahtijeva prognoziranje). Međutim, od modela se često zahtijeva ekstrapolacija u budućnost. Stoga, kako bi se pronašao najprikladniji model za prognoziranje budućih događaja, model treba razvijati na način pokazan na slici 4.20.



Slika 4.20. Opća metoda razvoja i izbora modela za vremenske nizove [69]

Kao što je pokazano na slici 4.20., prvi je korak podijeliti inicijalni vremenski niz podataka u dva skupa: povijesni skup podataka (engl. *historical set*; ponekad se naziva inicijalizacijskim ili trenaznim skupom) i validacijski³⁹ skup podataka (engl. *validation set*; koji se naziva i uzorkom za održanje (engl. *hold-out sample*) ili testnim uzorkom). Povijesni skup bi trebao uključivati znatan broj prošlih vrijednosti kako bi se smanjio učinak varijabilnosti uočenih u različitim točkama vremenskoga niza. Validacijski skup bi trebao sadržavati oko 12 podatkovnih točaka koje se nadovezuju na skup povijesnih podataka. Npr. za program upravljanja bolestima to bi bilo mjesečno promatranje tijekom 1 godine.

Sljedeći korak je razvoj modela i generiranje prognoze pomoću povijesnog skupa podataka. Pritom prognostički interval treba biti dugačak barem kao interval validacijskog skupa. Rezultati prognoze se uspoređuju sa stvarnim podacima u validacijskom skupu i mjeri se točnost prognoze. Temeljem usporedbe izmjerenih vrijednosti i prognoziranih rezultata nekoliko metoda (*SES, DES* ili Holt-Winters) odabire se model koji je najbolje prilagođen (engl. *best-fitting model*). Nakon odabira modela, ali prije korištenja u ocjeni/evaluaciji⁴⁰, i povijesni i validacijski skup podataka trebaju se objediniti, a model treba ponovno izgraditi sa svim raspoloživim podacima.

Osnovne jednadžbe Holt-Wintersovog modela su[69]:

$$L_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + b_{t-1}) \quad (4.18)$$

$$b_t = \beta(L_{t-1} - L_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (4.19)$$

³⁹ Validacija ili potvrđivanje (od engl. *validation*)

⁴⁰ Evaluacija ili ocjena (od engl. *evaluation*)

$$S_t = \gamma \frac{Y_t}{L_t} + (1 - \gamma)S_{t-s} \quad (4.20)$$

$$F_{t+m} = (L_t + b_t m)S_{t-s+m} \quad (4.21)$$

gdje je s duljina sezonskog ciklusa

Jedina značajna razlika u ovoj jednadžbi u odnosu na prethodnu (4.17) je procjena sezonalnosti S_t (jednadžba 4.20) koja se daje u obliku indeksa koji se koleba oko vrijednosti 1. Ipak, jednadžba (4.18) je slična svim ostalim jednadžbama zaglađivanja utoliko što se vrijednost $\frac{Y_t}{L_t}$ množi konstantom γ i tada se dodaje svojoj prethodnoj zaglađenoj procjeni koja je pomnožena s $(1 - \gamma)$. Važna razlika je u tome što S_t za dobru procjenu zahtijeva više od jednog podatka godišnje⁴¹. Za Holt-Wintersovu metodu, α se koristi za zaglađivanje slučajnosti (random komponente) na razini vremenskog niza, β se koristi za zaglađivanje trenda, a γ se koristi za zaglađivanje sezonske komponente vremenskog niza.

4.1.2.2.1.3. ARIMA modeli⁴²

ARIMA modeli su najprimjenjivanija metoda analize vremenskih nizova koja se susreće u literaturi o prognozama. Ove modele razvili su Box i Jenkins [71], a namjena im je matematičko opisivanje promjena niza tijekom vremena. Premda je ovaj model prilično složen, načelno se može objasniti u osnovnim pojmovima. Prema metodologiji Boxa i Jenkinsa modeliranje vremenskog niza sastoji se od tri empirijski upravljane faze: identifikacija, estimacija (procjenjivanje) i dijagnostičko testiranje.

Identifikacija

Ova prva faza procesa izgradnje modela uključuje: (1) ispitivanje podataka za otkrivanje svih uzoraka ponašanja, (2) ako je potrebno, manipuliranje podacima radi postizanja stacionarnosti i (3) identifikaciju potencijalnih modela.

Za razliku od tehnike eksponencijalnog zaglađivanja, gdje se brzo razvijaju različiti modeli rabeći računalno generirane algoritme i odabire se model koji najbolje odgovara, modeliranje ARIMA zahtijeva pregled podataka kako bi se otkrili uzorci (komponente vremenskog niza) prije nego što se bilo koji model može razviti. Dok se vizualnim pregledom dijagrama vremenskoga niza može jasno odrediti linearni trend ili postojanje sezonske komponente, članovi niza mogu sadržavati i dovoljno varijabilnosti (slučajna komponenta) koje su ovakvim pregledom teško uočljive pa su rezultati pregleda nepouzdana. Međutim, ovaj zadatak može se provoditi i empirijski pomoću statističkog alata pod nazivom autokorelacijska funkcija ACF (*engl. Autocorrelation Function*) koji daje točnije rezultate.

⁴¹ Proizlazi da ako za svaku godinu postoji samo jedan podatak, tada na godišnjoj razini ne postoji sezonalnost. Sezonalnost bi se mogla naći u dovoljno dugačkom vremenskom nizu, npr. kao petogodišnji ili osmogodišnji ciklus. Međutim, u slučaju broja registriranih vozila to ne važi.

⁴² ARIMA modeli su u ovome radu primijenjeni samo kao alat za izradu prognoza na temelju povijesnih podataka. Zbog toga je teorija vremenskih nizova objašnjena u mjeri koja je dovoljna za primjenu tih modela i razumijevanje utjecaja pojedinih parametara.

Kao što je ranije spomenuto, ono što razlikuje analizu vremenskih nizova od ostalih statističkih metoda jest to da su modeli vremenskih nizova izgrađeni na pretpostavci odnosa između pojedinih promatranja (za razliku od neovisnih eksplanatornih varijabli). ACF jednostavno pokazuje kako je svako promatranje povezano s prethodnim promatranjima (odatle naziv autokorelacija). Pregled ACF-a omogućuje otkrivanje uzoraka. Na primjer, ako postoji značajna autokorelacija između svakog 12. promatranja, možemo pretpostaviti da je u vremenskom nizu prisutna godišnja sezonalnost (uz pretpostavku da se podaci mjesečno zbrajaju). Da bi se izgradio uspješan model ARIMA, podaci moraju biti **stacionarni** (tj. ne smije biti linearnih trendova ni sezonalnosti). To omogućuje analitičaru da identificira druge temeljne odnose koje sadrže podaci, a koji bi inače bili zamagljeni ovim komponentama. Najčešće korištena tehnika za transformaciju vremenskih nizova u stacionarne je *diferenciranje*, čime se dobiva novi vremenski niz diferencija uzastopnih vrijednosti ($X_t - X_{t-1}$). Na primjer, prve diferencije su promjena između prvog i drugog opažanja (mjerenja), a sezonske razlike su promjena od jedne do druge godine (uz pretpostavku da se sezonska komponenta javlja svakih 12 mjeseci). *Niz se smatra stacionarnim kada ACF ne pokazuje statistički značajnu autokorelaciju između točaka podataka.* Diferenciranje vremenskog niza je pomalo analogno tehnici koja se koristi u drugim statističkim modelima, gdje je transformacija osnovnog skupa podataka sredstvo postizanja normalnosti, tako da parametarski statistički testovi mogu dati valjane rezultate.

Po završetku ovih početnih koraka, evaluator treba imati informacije potrebne za uspostavljanje privremenog modela. Iako postoji mnoštvo ARIMA modela, osnovni model uključuje barem jednu od sljedećih dviju komponenti: (1) autoregresijski parametar (AR) koji se oslanja isključivo na prošla promatranja zavisne varijable za prognoziranje sadašnjih ili budućih promatranja, ili (2) komponentu pomičnih prosjeka MA (*engl. Moving Average*) koja se u potpunosti oslanja na prošle pogreške (tj. na razliku između prošlih prognoza i stvarnih vrijednosti) kako bi se objasnile varijacije (slučajna komponenta). Štoviše, ako podaci na to ukazuju, ove dvije komponente mogu se ujediniti kako bi se stvorio autoregresijski pomični prosjek (model ARMA). Međutim, obično se podaci moraju najprije diferencirati, a time se stvara model ARIMA. "I" označava "integraciju", što se odnosi na činjenicu da se izvorni niz može ponovno rekonstruirati iz diferenciranog niza procesom integracije (koji uključuje zbrajanje u tipičnom diskretnom okruženju). Kao što je već navedeno, diferenciranje susjednih opažanja uklonit će trend iz podataka, dok će se diferenciranjem opažanja odvojenih za po 12 mjeseci iz izvornih podataka ukloniti sezonska komponenta.

Estimacija (procjenjivanje)

Prošli je odjeljak predstavio pregled elemenata ARIMA modela. Kad se identificira privremeni model, evaluator (ocjenitelj) se može osloniti na statistički softver za generiranje statističkih procjena, uključujući i test značajnosti svakog parametra modela. Ako neki parametar ne pridonosi modelu (tj. nije značajan), može se ukloniti, što će poboljšati prilagodbu cjelokupnog modela [69].

Dijagnostičko testiranje

Posljednja faza u procesu izgradnje ARIMA modela je pregled reziduala ili pogrešaka (razlika između prognoziranih vrijednosti i stvarnih vrijednosti) u odnosu na ACF. Ako je model dobro prilagođen, ACF treba pokazati da nema značajnih autokorelacija među rezidualima. Ako pak preostaju značajne autokorelacije, analitičar se mora vratiti na identifikacijske postupke kako bi procijenio jesu li otkriveni svi obrasci skriveni u podacima [69].

Zapisivanje modela ARIMA

U literaturi se modeli ARIMA zapisuju u obliku $ARIMA(p, d, q)$, gdje je p broj autoregresijskih parametara, d je red diferenciranja potreban za postizanje stacionarnosti, a q je broj parametara pomičnog prosjeka. Tako jedan model $ARIMA(p, q, d=1, 0, 0)$ označava autoregresijski model koji prognozira trenutnu vrijednost na temelju prethodnih podataka, $ARIMA(p, q, d=0, 0, 1)$ označava model s pomičnim prosjekom koji prognozira trenutnu vrijednost na temelju prethodnih prognoza i prethodne pogreške, a $ARIMA(p, q, d=1, 1, 0)$ označava integrirani autoregresijski model nestacionarnog vremenskog niza koji je jedanput diferenciran, nakon čega se prethodna prognoza koristi za prognoziranje trenutačne vrijednosti.

Ako je u postupku identifikacije utvrđeno da podaci sadrže sezonski element (tijekom pregleda ACF-a), onda bi model ARIMA trebalo razviti na upravo objašnjen način. Konačni model označen je sljedećom oznakom: $ARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_X$, gdje se (P, D, Q) odnosi na sezonsku komponentu, a X označava broj razdoblja između sezonskih šiljaka (tj. $X = 12$ u godišnjem ciklusu s mjesečnim podacima, $X = 7$ u tjednom ciklusu s dnevnim podacima).

Treba imati na umu da je diferenciranje samo jedna od metoda za postizanje stacionarnosti. Kod svakog vremenskog niza, za koji treba izraditi prognozu, postoji nekoliko načina preoblikovanja podataka u cilju postizanja stacionarnosti. Npr. ako je porast članova niza posljedica inflacije, stacionarnost se može postići pretvaranjem podataka u stabilnu novčanu jedinicu. Ako je pak u bolnicama nestacionarnost rezultat neredovitih isplata naknada za troškove liječenja, stacionarnost se može postići tako da se u modelu, umjesto novca, primijeni dan prijema u bolnicu ili neka druga relevantna veličina.

4.1.2.2.2. Mjerenje točnosti prognostičkih modela⁴³

Pogreška e_i prognozirane vrijednosti jednaka je razlici izmjerene y_i i prognozirane vrijednosti $\hat{y}_i$ [72]:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (4.22)$$

Cilj prognoziranja je pronaći model koji minimizira pogreške. Ocjenjivanje točnosti prognoza uobičajeno se provodi primjenom više mjera.

Najvažnije mjere točnosti prognoza su: *MAE* srednja apsolutna pogreška (*engl. Mean*

⁴³ Važniji izvori: Zaiontz [72]: <http://www.real-statistics.com/time-series-analysis/forecasting-accuracy/time-series-forecast-error/>, Linden [69],

Absolute Error), *MSE* srednja kvadratna pogreška (engl. *Mean Squared Error*), *RMSE* korijen srednje kvadratne pogreške (engl. *Root Mean Squared Error*):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad RMSE = \sqrt{MSE} \quad (4.23)$$

MAE je isto što i MAD (engl. *Mean Absolute Deviation*) [73]

te nadalje: *MPE* srednja postotna pogreška (engl. *Mean Percentage Error*), *MAPE* srednja apsolutna postotna pogreška (engl. *Mean Absolute Percentage Error*), *MASE* srednja apsolutna skalirana pogreška (engl. *Mean Absolute Scaled Error*), *SMAPE* simetrična srednja apsolutna postotna pogreška (engl. *Symmetric Mean Absolute Percentage Error*):

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{y_i} \quad MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{y_i} \right| \quad (4.24)$$

(kod MAPE se ne mogu međusobno poništiti pozitivne i negativne pogreške)

$$MASE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|}{\frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |y_i - y_{i-1}|} \quad SMAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\frac{(|y_i| + |\hat{y}_i|)}{2}} \quad (4.25)$$

4.1.2.2.3. Ostale primijenjene statističke veličine⁴³.

Autokorelacijska funkcija ACF [73]⁴⁴. Baš kao što korelacija mjeri razmjere linearnog odnosa između dvije varijable, autokorelacija mjeri linearni odnos između vrijednosti vremenskoga niza u pojedinim vremenskim točkama (lag-ovima). Autokorelacijska funkcija (ACF) se prikazuje pomoću korelograma. Svaki stupac u korelogramu odgovara jednom **koeficijentu autokorelacije**. Npr. R_1 mjeri odnos između y_i i y_{i-1} , R_2 mjeri odnos između y_i i y_{i-2} , i tako dalje. Opći izraz za koeficijent autokorelacije R_k reda k glasi:

$$R_k = \frac{\sum_{i=k+1}^n (y_i - \bar{y})(y_{i-k} - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.26)$$

Koeficijent autokorelacije nultoga reda ($k = 0$) jednak je jedan [70]⁴⁵. Koeficijent autokorelacije prvoga reda određuje se na temelju parova vrijednosti članova niza:

$$(y_2, y_1), (y_3, y_2), \dots, (y_i, y_{i-1}), \dots, (y_n, y_{n-1})$$

a koeficijent autokorelacije reda k na temelju parova:

$$(y_i, y_{i-k}), \quad i = k+1, k+2, \dots, n$$

Koeficijent autokorelacije prvoga reda vremenskoga niza $Y = y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$ jednak je:

$$R_1 = \frac{\sum_{i=2}^n (y_i - \bar{y})(y_{i-1} - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Funkcija parcijalne autokorelacije PACF se izračunava vrlo složenim postupkom, primjenom Yule-Walkerovih jednadžbi [70]⁴⁶. Ovaj postupak je automatiziran u svim statističkim računalnim paketima.

Korelogrami prikazuju, za vremenski niz duljine n , koeficijente autokorelacije (**ACF**), odnosno koeficijente parcijalne autokorelacije (**PACF**), od prvog⁴⁷ do k -tog reda, gdje je $k = 0, 1, 2, \dots, (< n)$. Vrijednosti funkcija ACF i PACF se kreću u zatvorenom intervalu $[-1, 1]$. [70]⁴⁸

⁴⁴ R. Hyndman [73], <https://otexts.org/fpp2/autocorrelation.html>

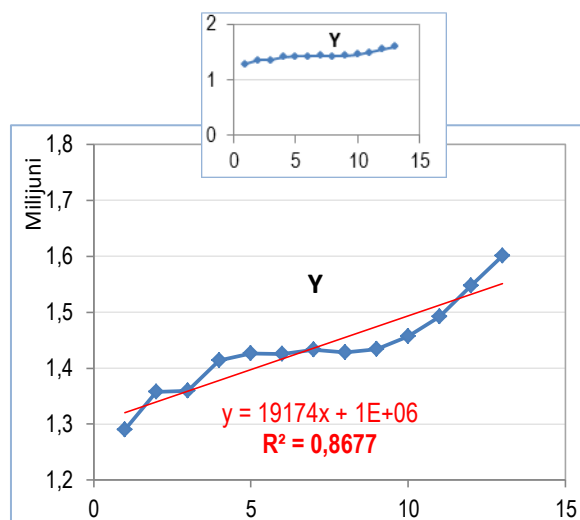
⁴⁵ Šošić [70], str. 667, 668.

⁴⁶ Šošić [70], str. 668. Ispisivanje ovih jednadžbi u ovom slučaju ne bi pridonijelo jasnoći uvida u modele ARIMA.

4.1.2.3. Formiranje modela ARIMA za flotu vozila kategorije M1

Da bi se na vremenski niz mogao primijeniti model ARIMA, niz mora biti stacionaran i ne smije imati sezonsku komponentu. Stacionarnost u pravilu znači da niz ne smije imati uzlazni ni silazni trend, a sezonalnost je periodičko ponavljanje istog ili sličnog uzorka. Ova oba svojstva mogu se procijeniti vizualnim pregledom dijagrama. Slika 4.21. pokazuje da niz možda nije stacionaran, jer se uočava blagi uzlazni trend. Zbog toga je izvorni niz jedanput diferenciran, programskim paketom *Real Statistics Using Excel* izračunate su vrijednosti autokorelacijske funkcije ACF i funkcije parcijalne autokorelacije PACF te su nacrtani njihovi dijagrami – korelogrami, slika 4.22. Svi stupci korelograma ACF i PACF niza prvih diferencija ΔY_1 nalaze se unutar granica pouzdanosti, što znači da mogu biti i jednaki nuli⁴⁹ te su zbog toga neupotrebljivi za identificiranje parametara modela ARIMA. Zbog toga su za identifikaciju parametara (p, d, q) primijenjeni korelogrami izvornog niza Y .

Godina	Broj vozila	1. diferencije	2. diferencije
X	Y	ΔY_1	ΔY_2
2005	1.290.142		
2006	1.357.580	67.438	
2007	1.359.374	1.794	-65.644
2008	1.414.280	54.906	53.112
2009	1.426.452	12.172	-42.734
2010	1.425.699	-753	-12.925
2011	1.433.064	7.365	8.118
2012	1.428.608	-4.456	-11.821
2013	1.434.207	5.599	10.055
2014	1.456.922	22.715	17.116
2015	1.492.342	35.420	12.705
2016	1.547.596	55.254	19.834
2017	1.600.363	52.767	-2.487

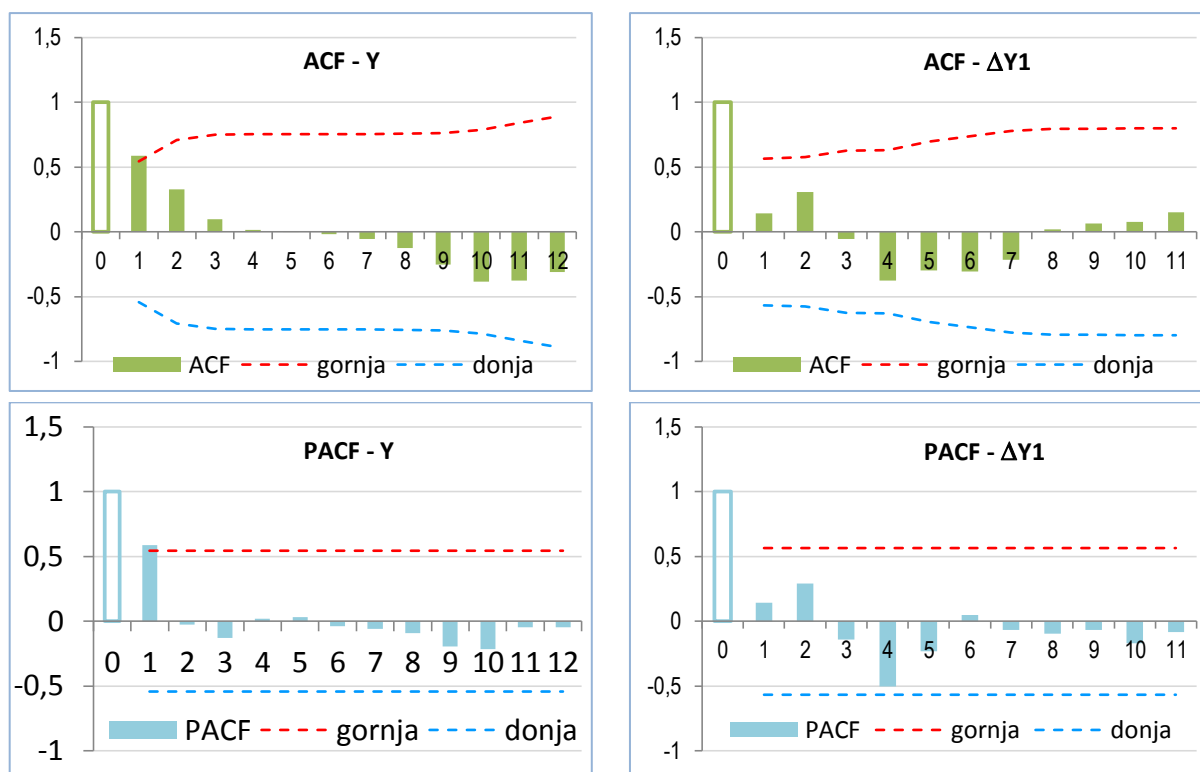


Slika 4.21. Vremenski niz broja vozila u floti M1. Vrijednosti niza nacrtane su u dva dijagrama različitih raspona osi Y da bi se pokazalo da subjektivan vizualni dojam uzlaznog trenda jako ovisi o odabranom rasponu osi Y.

⁴⁷ U većini statističkih računalnih paketa u korelogramu se crta i nulti stupac čija je visina uvijek jednaka 1. On nema nikakvog značaja za korelaciju unutar vremenskog niza jer predstavlja korelaciju prvog člana niza sa samim sobom. Zbog toga se u korelogramima i često izostavlja.

⁴⁸ Šošić [70], str. 664.

⁴⁹ Ovo je posljedica prekratkog niza. Da niz ima barem 30 članova, najmanje jedan stupac (onaj na broju 1) probio bi granice pouzdanosti.



Slika 4.22. Korelogrami izvornog niza broja vozila u floti M1 i niza njegovih prvih diferencija. U crtane su granice pouzdanosti (upper, lower) za razinu signifikantnosti $\alpha = 0,05$ ⁵⁰. (Na osi X su lag-ovi, odnosno red koeficijenata autokorelacije/parcijalne autokorelacije.)

Identifikacija parametara p, d, q

U pregledanoj literaturi⁵¹ o identifikaciji parametara (p, d, q) procesa ARIMA jasnoćom se izdvajaju opisi u paketu Minitab i u IBM-ovu statističkom paketu SPSS. Ovaj potonji je dan ovdje u sažetom obliku:

- Kod nestacionarnih nizova⁵² AFC ima značajne (signifikantne) vrijednosti u šest ili više lag-ova prije nego što počne brzo konvergirati prema nuli. Takve nizove treba diferencirati sve dok se ne postigne stacionarnost i tek se potom mogu identificirati.
- Autoregresijski procesi $AR(p)$ imaju ACF koji se eksponencijalno smanjuje i imaju šiljke⁵³ u prvom ili više lag-ova PACF-a. Broj PACF šiljaka jednak je redu autoregresije p .

⁵⁰ To znači da će se na temelju korelograma u najviše 5 % slučajeva zaključiti da se ACF (PACF) ne razlikuje značajno (signifikantno) od nule, ako on ipak jest značajno različit od nule. (Za odabranu vrijednost $\alpha = 0,05$ granica intervala pouzdanosti iznosi $1 - \alpha$ ili 95 %.)

⁵¹ Pregledani i ovdje citirani izvori: Šošić [70]; Box–Jenkins method, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Box%E2%80%93Jenkins_method#Identify_p_and_q;

Interpret the key results for ARIMA, Minitab [74]

Interpret the partial autocorrelation function (PACF), Minitab [75];

Guide to ACF/PACF Plots, in SPSS Trends 10.0 [76] i

ftp://ftp.boulder.ibm.com/software/analytics/spss/support/Stats/Docs/Statistics/Miscellaneous/Guide_to_ACF_PACF_plots.pdf; Vogel [77]; Arima Identification, Real Statistics Using Excel [72] na stranici: <http://www.real-statistics.com/time-series-analysis/arima-processes/arima-identification/>.

⁵² Odnosi se na čiste ili teorijske ARIMA procese kakvi u stvarnosti gotovo da i ne postoje.

- Procesi pomičnih presjeka $MA(q)$ imaju u korelogramu ACF šiljak u prvom ili više lag-ova, a PACF se smanjuje eksponencijalno. Broj ACF šiljaka jednak je redu pokretnog prosjeka q , odnosno širini prozora pokretnog prosjeka.
- Miješani procesi (ARMA, ARIMA⁵⁴) pokazuju tipično eksponencijalno opadanje i ACF-a i PACF-a.

Promotrite li se korelogrami izvornog niza Y na slici 4.22. može se zaključiti sljedeće:

- izvorni niz Y je stacionaran (postoji samo jedan šiljak ACF)
- proces ima parametre: $ARIMA(p = 1, q = 1, d = 0)$.

Glavni nedostatak vremenskog niza u ovome slučaju je premali broj podataka za pouzdano prognožiranje metodama analize vremenskih nizova. Na raspolaganju je samo jedanaest pouzdanih podataka (broj godišnje registriranih vozila od 2007. do 2017.) od kojih je za izračun emisija uzeto u obzir samo prvih deset⁵⁵. Tijekom izrade modela korišteni su i manje pouzdani podaci koji sežu do 1996. godine, čime se dobio vremenski niz od ukupno 21 člana⁵⁶. Međutim, i to je ispod praga prihvatljivosti (minimum 30 članova za modele ARIMA⁵⁷). S druge strane, sposobnost prognostičkog modela ispituje se uobičajeno tako da se raspoloživi set podataka podijeli na dva dijela: na jedan *in-sample period*, koji se primjenjuje za početnu ocjenu parametara i izbor modela, te na drugi *out-of-sample period* koji se koristi za ocjenu prognostičkih sposobnosti modela⁵⁸. Za sve ovo je raspoloživ vremenski niz prekratak⁵⁹. Zbog toga je kod izbora modela primijenjen i kriterij AIC (*Akaike Information Criterion*), premda ni tu ne postoje čvrsta pravila^{60 61}.

Interpretacija AIC i BIC.⁶² AIC je procjena konstante plus relativne udaljenosti između nepoznate stvarne funkcije vjerojatnosti podataka i prilagođene funkcije vjerojatnosti modela, tako da *niži AIC znači da je model bliže stvarnim podacima*. BIC je procjena funkcije

⁵³ Stupce u korelogramu koji probijaju granice intervala pouzdanosti.

⁵⁴ ARMA se sastoji od autoregresijskog procesa (AR) i procesa pomičnih prosjeka (MA). ARIMA je poopćeni (integrirani) oblik procesa ARMA. Modeliranje je postupak kojim se proces prilagođava empirijskim podacima (rezultatima mjerenja).

⁵⁵ Za 2017. godinu još nisu bili dostupni podaci o količinama goriva utrošenog u cestovnom prometu.

⁵⁶ Drugi set podataka ide od 1996. do 2016. godine. U dijelu od 2006. do 2016. podaci se ne poklapaju s prvim, pouzdanim setom podataka.

⁵⁷ R. Hyndman [73]: Fitting models to short time series (4 March 2014),

<https://robjhyndman.com/hyndsight/short-time-series/>

⁵⁸ eurostat Statistics Explained, Glossary: In-sample vs. out-of-sample forecasts,

[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:In-sample vs. out-of-sample forecasts](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:In-sample_vs._out-of-sample_forecasts)

⁵⁹ How do you define your out-of-sample size (e.g. 15% of entire data) for variety of data frequencies (e.g. monthly)?, https://www.researchgate.net/post/How_do_you_define_your_out-of-sample_size_eg_15_of_entire_data_for_variety_of_data_frequencies_eg_monthly

⁶⁰ R. Hyndman: Facts and fallacies of the AIC (3 July 2013), <https://robjhyndman.com/hyndsight/aic/>

⁶¹ D. Anderson and K. Burnham: AIC myths and misunderstandings (April 12 2006), <https://sites.warnercnr.colostate.edu/anderson/wp-content/uploads/sites/26/2016/11/AIC-Myths-and-Misunderstandings.pdf>

⁶² AIC vs. BIC, The Methodology Center, PennState College, The Pennsylvania State University, <https://methodology.psu.edu/AIC-vs-BIC>

*priorne vjerojatnosti*⁶³ da je model istinit, prema određenim Bayesovim postavkama, tako da niži BIC znači da je vjerojatnije da će razmatrani model biti istinit model. Oba se kriterija temelje na različitim pretpostavkama i različitim asimptotskim aproksimacijama. Stoga svaki od njih podliježe kritici u pogledu upitne valjanosti za podatke u stvarnom svijetu. No, unatoč raznim profinjenim teorijskim razlikama, njihova jedina razlika u praksi je veličina kazne: BIC snažnije penalizira (kažnjava) kompleksnost modela. Jedini slučaj kad se oni razilaze jest kada AIC odabere model s većim parametrima nego BIC. Zbog toga je općenito kod odabira modela najbolje koristiti i AIC i BIC.

4.1.2.4. Međusobna usporedba primijenjenih ARIMA modela

Zbog premale duljine izvornog niza od samo 13 podataka (2005. do 2017.), pored modela ARIMA(p,d,q=1,0,1) razmotreni su još neki više i manje izgledni modeli. Pritom je notacija prilagođena onoj u dodatku *Real Statistics Using Excel* pa se proces bilježi u izmijenjenom redoslijedu parametara:

$$\text{ARIMA}(p,q,d)$$

Rezultati su pokazani u tablici 4.3. i na slikama 4.23. do 4.25. Promotri li se tablica i dijagrami, na prvi se pogled čini kao da je najbolji model (5,1,0): on ima najmanji zbroj kvadrata pogrešaka SSE (*Sum of Squares of Errors*), granice intervala pouzdanosti su najuže, a također ima druge po rangju najniže vrijednosti za AIC i BIC. Uzrok ovih prividno najboljih rezultata je preveliki red parcijalne autokorelacije ($p = 5$). On ima za posljedicu da se u prvih pet vremenskih točaka kao vrijednosti prognostičke funkcije uzimaju vrijednosti odgovarajućih članova izvornog niza (ovo se lijepo vidi u dijagramu reziduala koji u tim točkama imaju vrijednost nula), a tek iza toga se pojavljuju vrijednosti funkcije ARIMA s vrijednostima PACF funkcije širine 5 vremenskih točaka. S obzirom na to da je već izvorna krivulja prilično blaga i bez naglih promjena, preostale točke prognostičke krivulje su lijepo zaglađene tako širokim prosjecima pa su i statističke pogreške male. Zato su i granice pouzdanosti ispale nerealno uske. Međutim, na ovaj način izvornom je nizu amputirano prvih pet točaka (broj aktivnih točaka „size“ u tablici 4.3. je spao na 8) pa je ionako prekratak niz gotovo prepolovljen. Zbog toga se ova prognoza treba smatrati nerealnom.

Dodatno objašnjenje. Za razliku od dijagrama na slikama 4.23. i 4.24. gdje su prognostička funkcija $\hat{Y}$ i granice pouzdanosti nacrtane u intervalu [2017. – 2030.] tj. samo izvan intervala poznatih vrijednosti [2005. – 2017.] i priključene na zadnju poznatu točku Y_{2017} , na slici 4.25. su te krivulje nacrtane i u intervalu poznatih vrijednosti [2005. – 2017.]. Mjere točnosti prognostičkih modela u tablici 4.3. (SSE i ostale) odnose se na interval poznatih vrijednosti. Pri izboru modela načelno se smatra da će model koji je bolji u intervalu poznatih vrijednosti biti bolji i kod prognoza izvan tog intervala.

Zaključak

⁶³ *Priorna* vjerojatnost je početna vjerojatnost temeljena na iskustvu. Tu se vjerojatnost nastoji revidirati nakon dobivanja novih informacija. Tako revidirana vjerojatnost naziva se *posteriornom* vjerojatnošću. Detaljne definicije: Šošić [70], str. 142.

- (1) Svi koliko-toliko realni modeli prognoziraju za 2030. godinu 2,0 milijuna automobila M1.
- (2) S obzirom na to da se u većini literature kod kratkih nizova daje prednost jednostavnim modelima⁶⁴, te da u ACF i u PACF korelogramu samo u prvom lag-u šiljak probija granicu pouzdanosti, **najboljim** se smatra model **ARIMA**($p, q, d = 1, 1, 0$).
- Razlike između njega i prvog modela **ARIMA**($p, q, d = 1, 0, 0$) su neznatne.

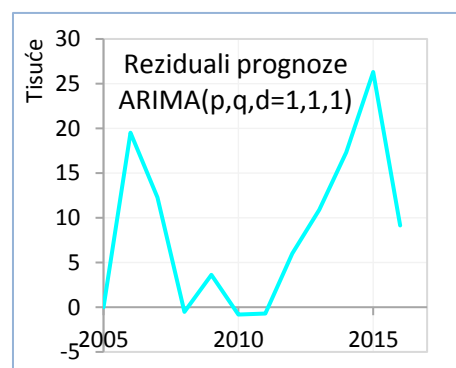
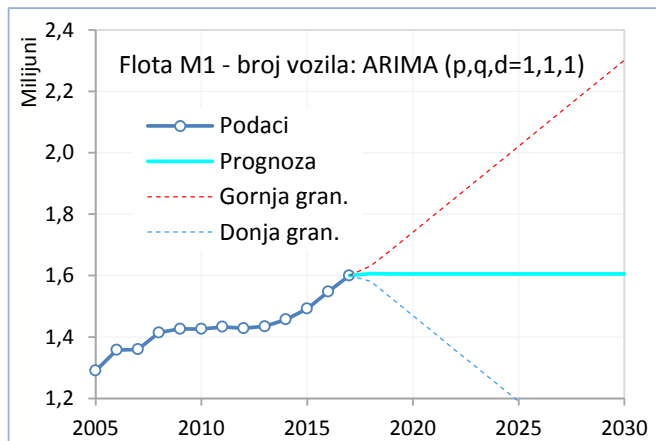
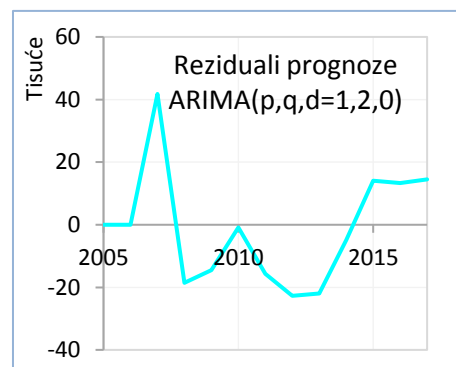
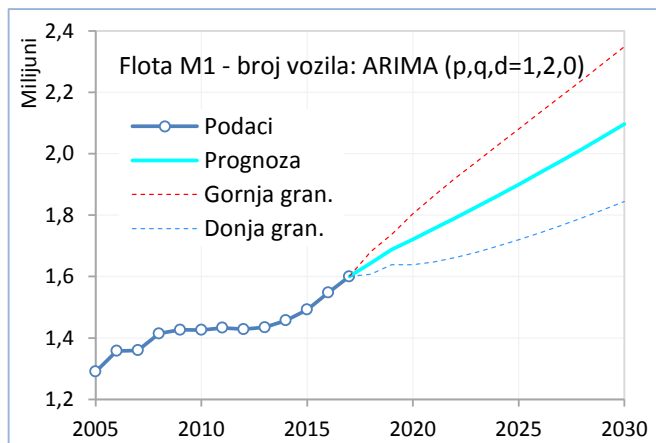
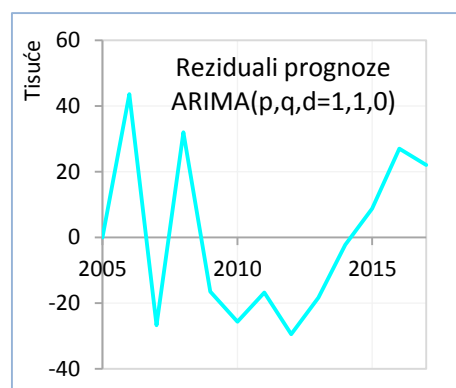
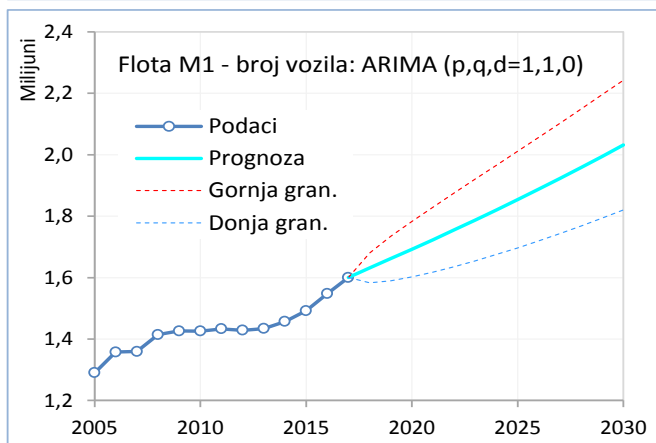
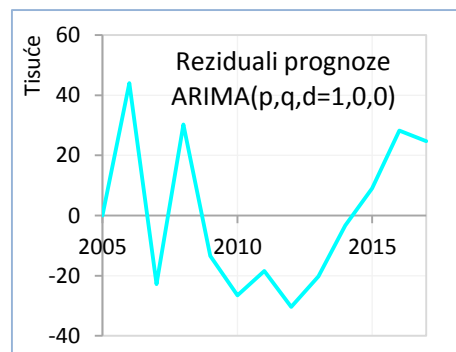
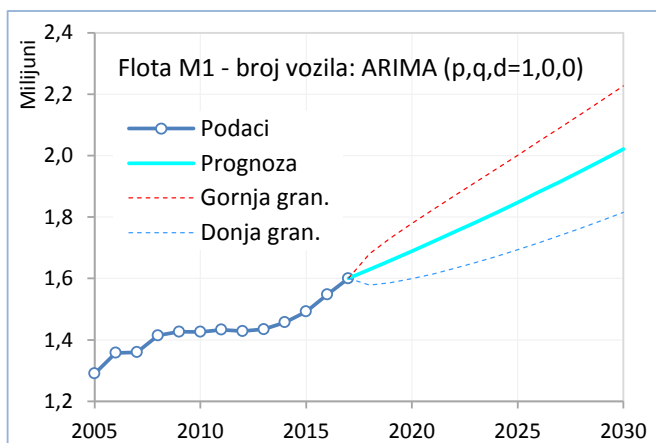
⁶⁴ Armstrong [78] (str. 228) preporuča primjenu najjednostavnijih modela ako ima premalo povijesnih podataka ili ako je povijesni vremenski niz nestabilan.

Error Statistics ARIMA (p,q,d)													
(p,q,d)	(1,0,0)	(1,1,0)	(1,2,0)	(1,1,1)	(2,0,0)	(3,0,0)	(3,6,0)	(4,0,0)	(4,1,0)	(5,0,0)	(5,1,0)	(5,5,0)	
me	77,09	-170	-296	1.419.470	-254	-90	20	-131	1.470	9	-9	81	
mse	5,73E+08	5,67E+08	3,29E+08	2,02E+12	4,04E+08	2,56E+08	9,03E+07	1,32E+08	3,94E+07	6,28E+06	5,99E+06	4,49E+06	
rmse	23.930	23.810	18.151	1.421.961	20.110	16.002	9.502	11.495	6.278	2.506	2.447	2.118	
mae	20.892	20.721	14.950	1.419.470	16.733	12.125	7.071	8.497	4.454	1.481	1.304	1.411	
mpe	-0,00014	-0,00031	-0,00032	0,98834	-0,00053	-0,00024	-0,00011	-0,00024	0,00092	0,00001	-0,00002	0,00006	
mape	0,01454	0,01445	0,01047	0,98834	0,01150	0,00832	0,00483	0,00581	0,00301	0,00098	0,00086	0,00094	
smape	0,01456	0,01447	0,01048	1,94908	0,01151	0,00831	0,00483	0,00580	0,00301	0,00098	0,00086	0,00094	
u1	0,00832	0,00828	0,00631	0,96999	0,00699	0,00556	0,00330	0,00400	0,00218	0,00087	0,00085	0,00074	
u2	0,70040	0,69933	0,54046	39,45205	0,57391	0,45468	0,26958	0,32373	0,17499	0,06868	0,06728	0,05774	
size	12	12	12	11	11	10	10	9	9	8	8	8	
SSE	7,44E+09	7,37E+09	4,28E+09	1,78E+09	5,26E+09	3,33E+09	1,17E+09	1,72E+09	5,12E+08	8,16E+07	7,78E+07	5,83E+07	
SSE (K9:K16)	3,89E+09	3,45E+09	1,99E+09	1,25E+09	3,12E+09	2,55E+09	8,69E+08	1,46E+09	4,31E+08	8,16E+07	7,78E+07	5,83E+07	
LL	-138,5	-138,4	-135,2	-119,6	-125,5	-112,3	-107,1	-98,6	-93,1	-75,9	-75,7	-74,6	
AIC	244,9	248,8	244,3	213,9	223,8	202,2	205,8	181,6	172,7	139,1	142,7	148,4	
BIC	245,4	250,3	246,3	215,1	224,6	203,1	208,8	182,6	173,9	139,5	143,3	149,3	

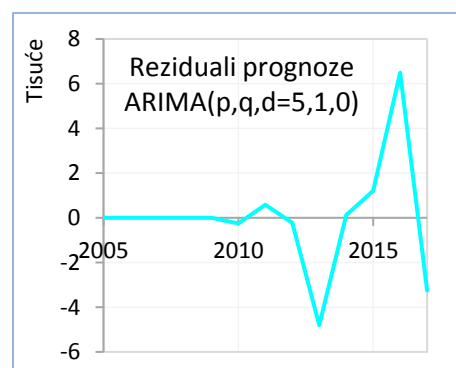
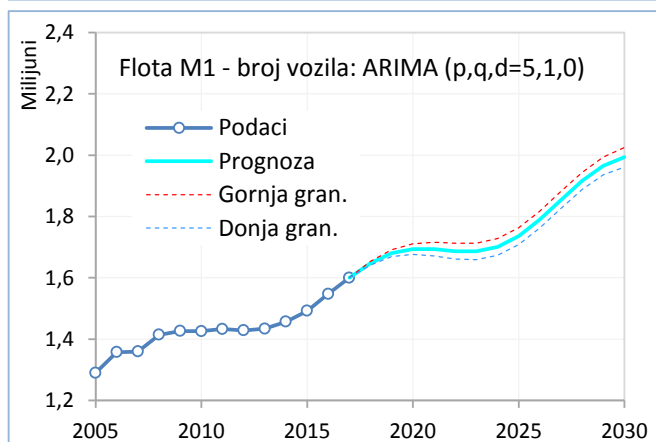
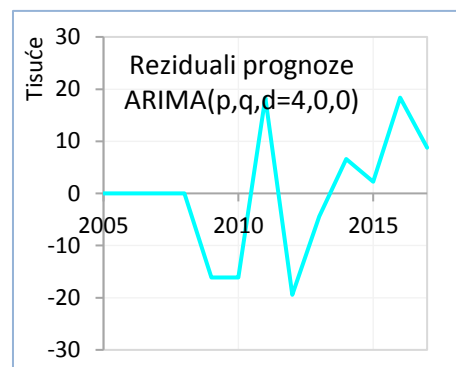
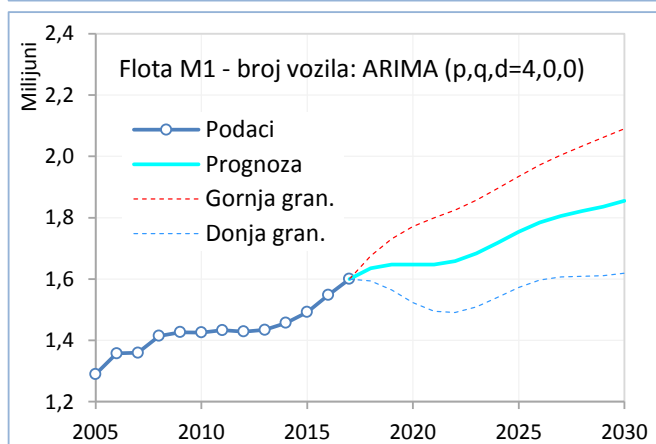
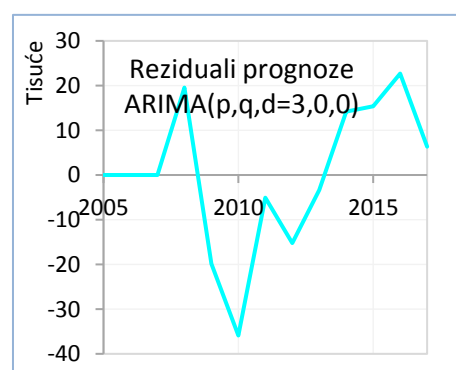
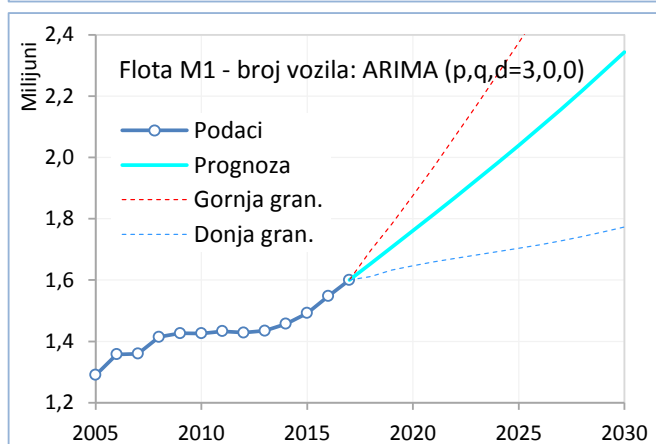
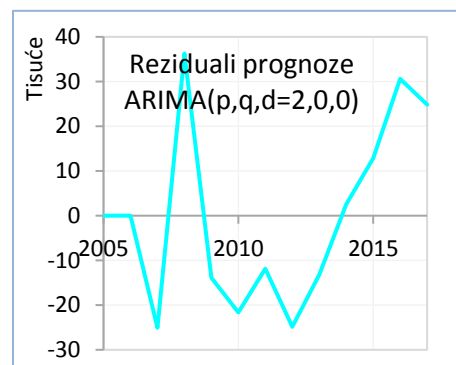
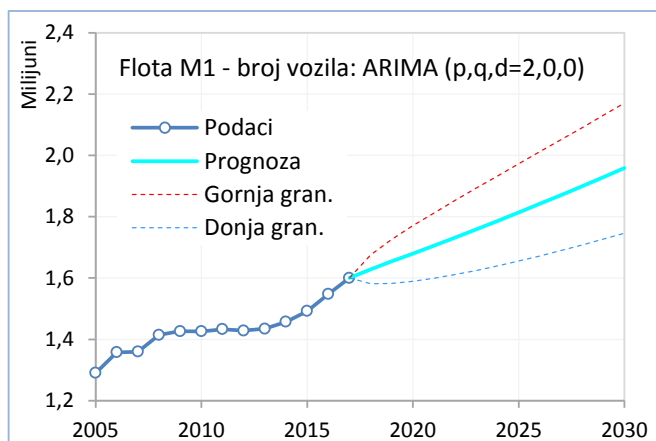
Ružičasto: 2 najveća rezultata; zeleno: 2 najmanja.

mse - Mean Squared Error; rmse - Root Mean Square Error; mae – Mean Absolute Deviation; mpe - Mean Percentage Error; mape - Mean Absolute Percentage Error; size – broj aktivnih članova niza; SSE = SSE(size); SSE(K9:K16) – SSE za isti raspon (za minimalni size); LL – logaritam vjerojatnosti vremenskog niza (LL - log likelihood)

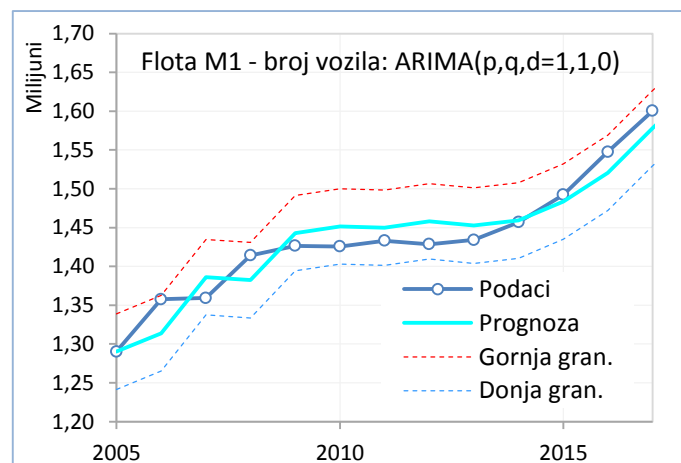
Tablica 4.3. Usporedba statističkih pogrešaka i kriterija odabranih modela ARIMA



Slika 4.23. Usporedba prognoza i reziduala odabranih modela ARIMA



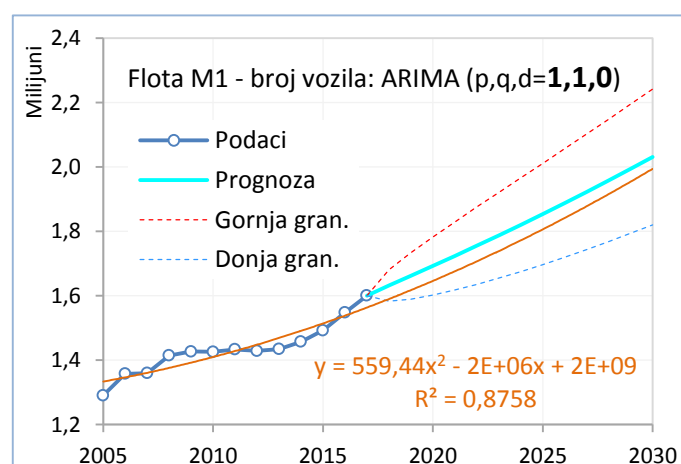
Slika 4.24. Usporedba prognoza i reziduala odabranih modela ARIMA - nastavak



Slika 4.25. Prognostička funkcija *forecast* modela ARIMA unutar intervala podataka

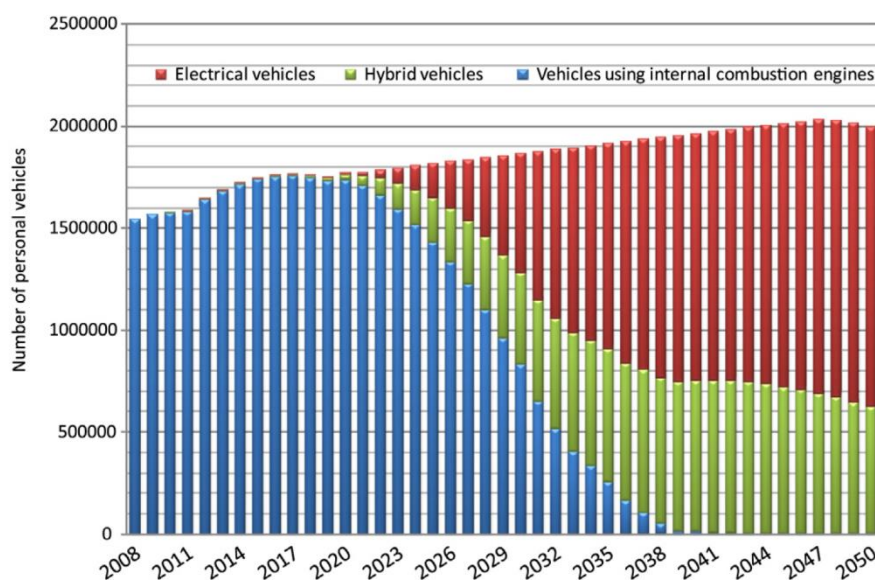
4.1.2.5. Usporedba s drugim modelima

Prva tri modela ARIMA za 2030. godinu prognoziraju vrijednost koja vrlo čvrsto korelira s trendom polinoma 2. stupnja.

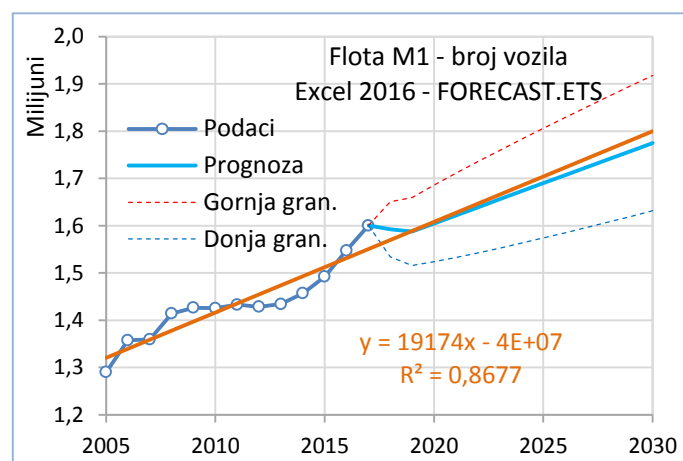


Slika 4.26. Usporedba prognoze modelom ARIMA i regresijskim polinomom 2. stupnja

Oblik prognostičke funkcije *forecast* modela ARIMA($p, q, d = 1, 1, 0$) relativno se dobro poklapa s prognostičkom krivuljom broja vozila kategorije M1 pokazanom u radu Pukšec et al. [79] iz 2013. godine. Prognostička krivulja u ovoj disertaciji je doduše pomaknuta prema gore što je posljedica u međuvremenu registriranih vozila. (Pukšec et al. raspolagali su podacima do zaključno 2008. godine, [79], sl. 3. i 6.) To samo pokazuje da je kod ovako dugoročnih prognoza kratkih vremenskih nizova nakon svakog novog podataka (broja vozila u kalendarskoj godini) potrebno stalno korigirati prognozu. Iako su pogreške na velikoj vremenskoj udaljenost znatne, ove prognostičke metode daju dobar uvid u buduće događaje i s protekom vremena omogućuju sve sigurnije navođenje empirijskog procesa prema zadanom cilju.



Slika 4.27. Prognoza broja i strukture vozila kategorije M1 u Hrvatskoj [79]



Slika 4.28. Prognoza trostrukim eksponencijalnim zaglađivanjem (Excel 2016, FORECAST.ETS)⁶⁵

Prognoza trostrukim eksponencijalnim zaglađivanjem u Excelu 2016 (funkcija FORECAST.ETS) daje znatno niže vrijednosti nego ARIMA i vrlo dobro odgovara linearnom trendu (slika 4.28.).

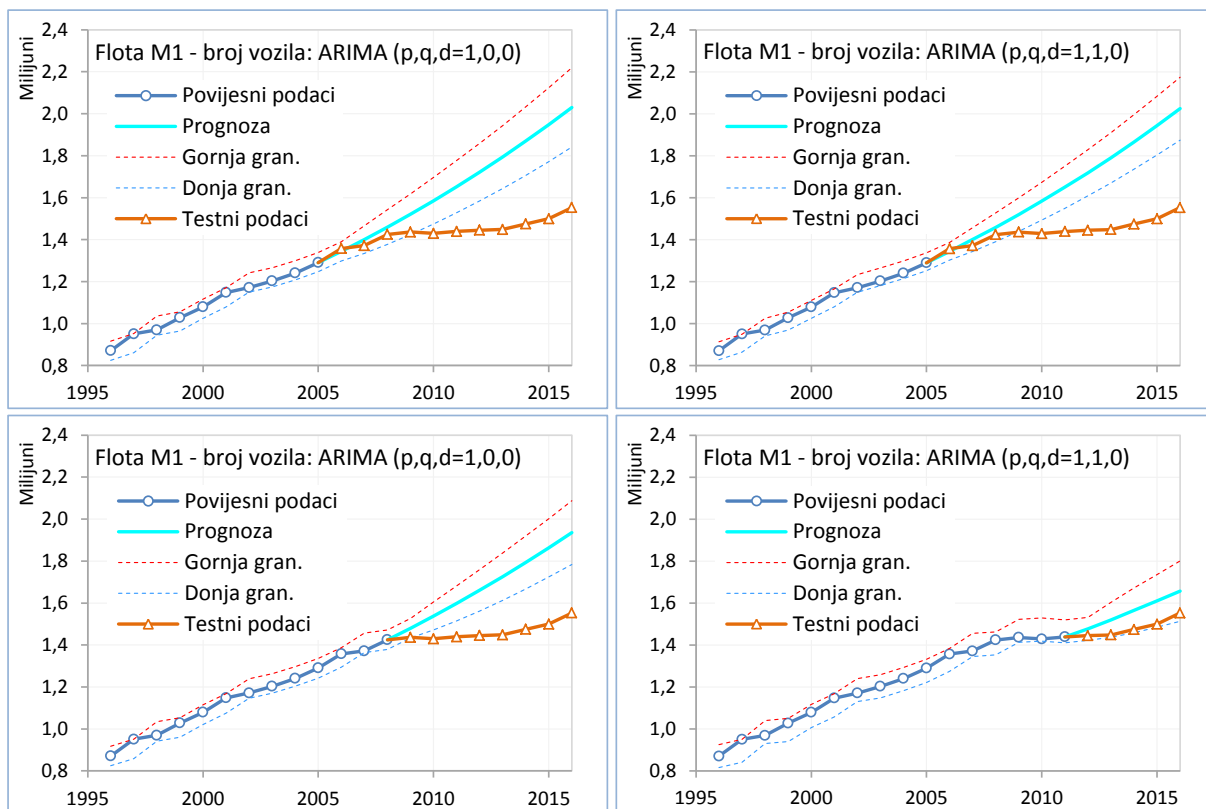
4.1.2.6. Testiranje na povijesnim podacima

Testiranje je provedeno na vremenskom nizu podataka o broju vozila od 1996. do 2016. godine.⁶⁶ U tu je svrhu ovaj niz podijeljen u dva dijela: prvi, za formiranje modela ARIMA, na koji se nadovezuje drugi, za testiranje prognostičkih sposobnosti modela. Ispitana su tri najbolja modela ARIMA $(p,q,d) = (1,0,0), (1,1,0), (1,1,1)$. Ukupan broj vremenskih točaka,

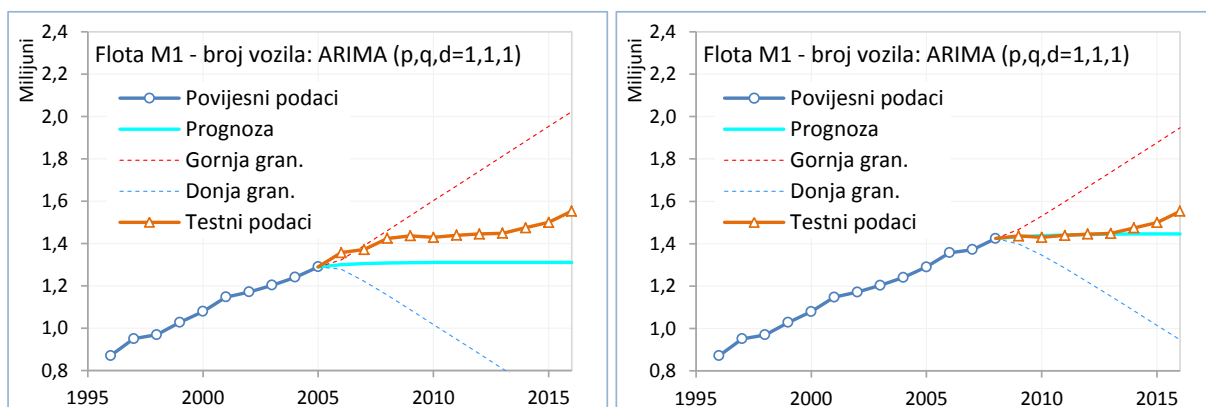
⁶⁵ Granice intervala pouzdanosti odgovaraju približno rasponu od $\pm 2\sigma$ od aritmetičke sredine.

⁶⁶ Kao što je već navedeno u bilješki⁵⁶, ovaj niz nije dovoljno konzistentan (npr. nedostaju podaci o emisijskim razinama vozila i o stanju putomjera) za provedbu analiza vezanih uz emisije, ali je zbog znatno veće duljine (obuhvaća 21 godinu) puno bolji za provedbu testiranja modela na povijesnim podacima od pouzdanog niza od samo deset uzastopnih godina koji je temelj ovoga rada.

odnosno lagova vremenskog niza, iznosio je 21 i bio je podijeljen u dva dijela (modelski + prognostički) i to u tri varijante: 10 + 11, 13 + 8, 16 + 5. Rezultati (Slika 4.29) pokazuju da između modela (1,0,0) i modela (1,1,0) nema velikih razlika, a niti povećanje duljine niza za formiranje modela s 10 na 16 ne donosi bitna poboljšanja. Jedanput jedan ima uže granice intervala pouzdanosti, a drugi puta drugi. Međutim, bitno su drugačije prognoze modela (1,1,1). U tom se modelu formira novi niz koji sadrži prve diferencije izvornoga niza te se prognoziranje provodi u domeni niza prvih diferencija, a potom se rezultati vraćaju u domenu izvornoga niza. Prognoze ovog modela su praktički horizontalne, bez uzlaznog trenda, za razliku od prognoza prva dva modela (1,0,0 i 1,1,0) koje su uvijek uzlazne.

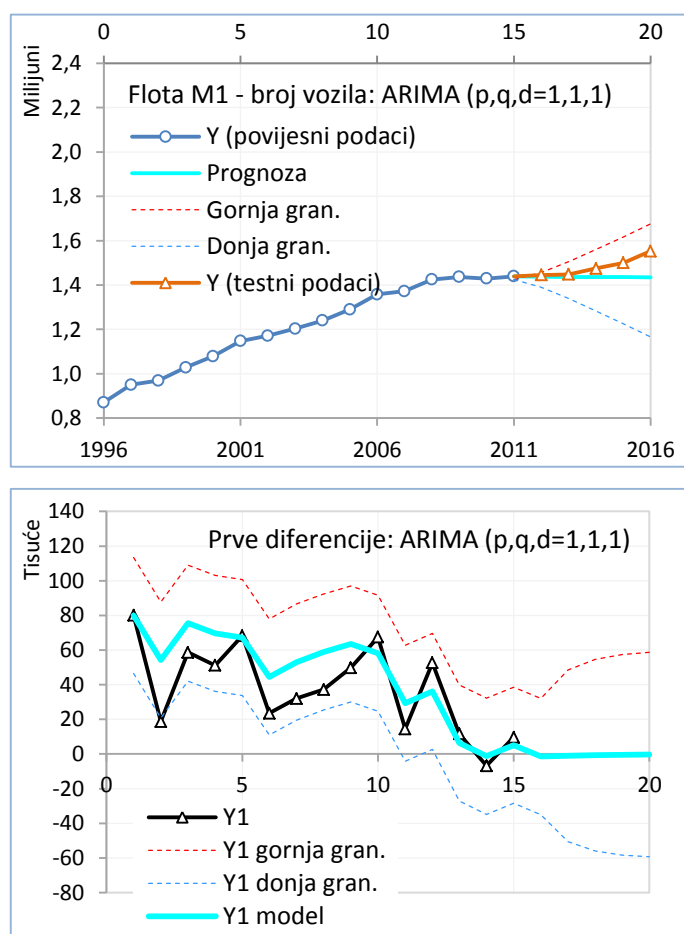


Slika 4.29. Testiranje modela ARIMA na povijesnim podacima. Niz za formiranje modela završava u gornjem redu s 2005. godinom, a u donjem redu s 2008. (lijevo) i 2011. (desno).



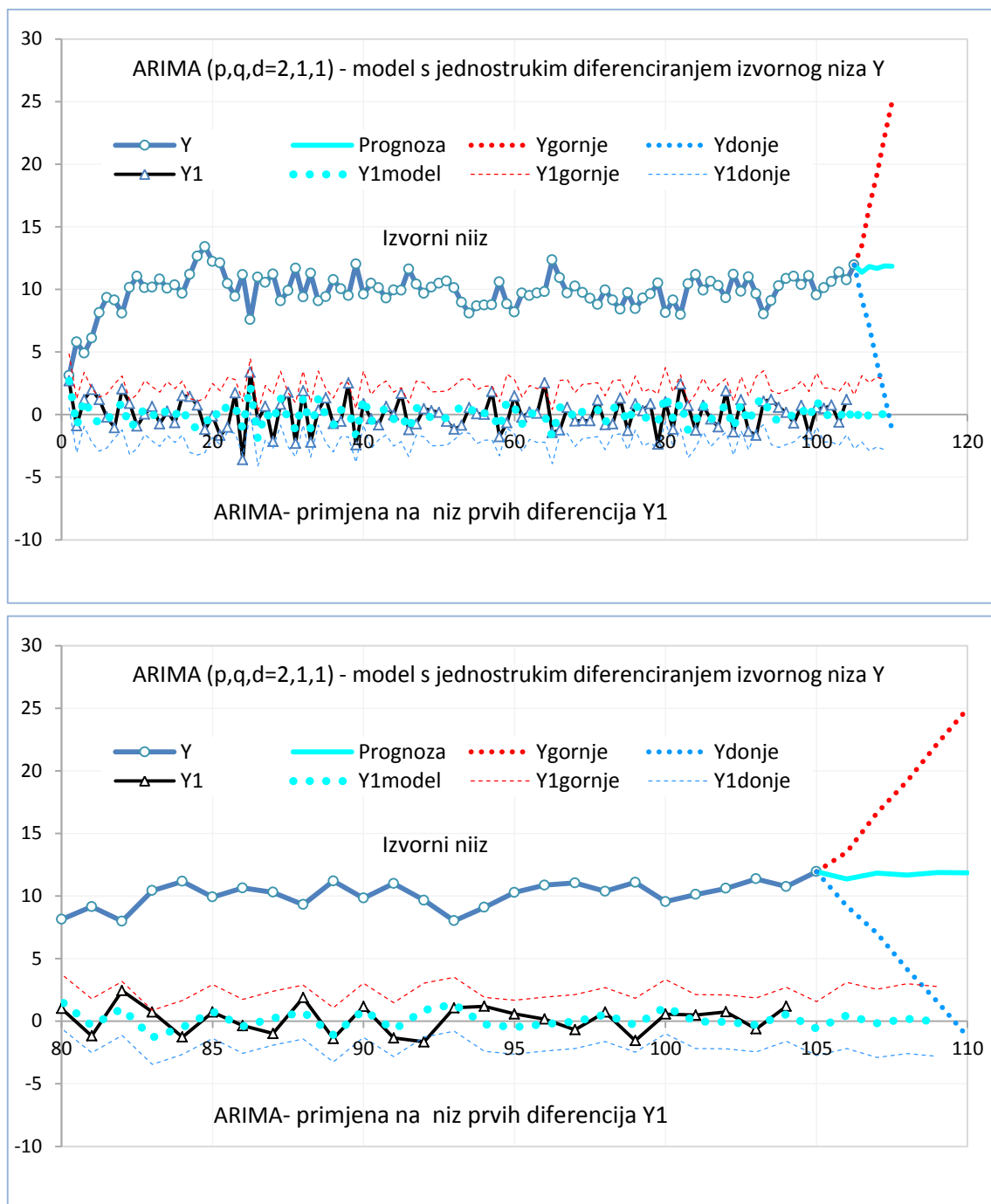
Slika 4.30. Testiranje modela ARIMA($p,q,d=1,1,1$) na povijesnim podacima. Prognoza od 2006. godine (lijevo) je promašaj, a od 2009. (desno) ne može biti bolja!

Da bi se odgovorilo na pitanje zašto je kod modela $ARIMA(p,q,d=1,1,1)$ prognostička krivulja u području budućnosti horizontalna i ravna, nacrtani su dijagrami na slici 4.31. U *gornjem je dijagramu* pokazan prvi dio povijesnog vremenskog niza **Y (povijesni podaci)** (tj. broj vozila na dan 31. prosinca tekuće godine) koji služi za formiranje modela ARIMA. Zatim je pokazana prognoza u budućnost **Prognoza**, s donjom i gornjom granicom **Gornja gran.**, **Donja gran.** intervala pouzdanosti prognoze (95 %) te drugi dio povijesnog vremenskog niza **Y (testni podaci)** koji služi za ispitivanje prognostičkih sposobnosti modela. *Donji dijagram* pokazuje unutarnje ustrojstvo modela ARIMA. Oznake su: **Y1** – prve diferencije izvornog vremenskog niza Y (Data); **Y1 model** – prognostička funkcija modela za niz prvih diferencija Y1; **Y1 gornja gran.**, **Y1 donja gran.** – gornja i donja granica intervala pouzdanosti prognoze krivulje Y1model. Budući da donji dijagram ima na apscisi **lagove** (relativne vremenske položaje promatranog podatka u odnosu na susjedne), na gornjem dijagramu su nacrtane dvije apscise: donja s kalendarskim godinama i gornja s odgovarajućim lagovima. Donji dijagram pokazuje da je i prognostička krivulja **Y1 model** praktički potpuno ravna izvan područja vrijednosti niza **Y (povijesni podaci)** (od laga 16 nadalje, lag 16 ekvivalentan je godini 2012.).



Slika 4.31. Testiranje modela $ARIMA(p,q,d=1,1,1)$ na povijesnim podacima (gore) i unutarnji ustroj prognostičkog procesa (dolje)

S obzirom na to da je i ovaj ispitni niz (1996.-2016.) kratak za pouzdanu prognozu po kriterijima vremenskih nizova, ispitan je utjecaj duljine niza na prognozu modela ARIMA kod kojeg se primjenjuje jednostruko diferenciranje ($d=1$). U tu je svrhu analiziran jedan drugi niz duljine 105 članova, dan kao primjer u [72]. Vidi se (slika 4.32.) da kod ovog dugačkog niza prognostička krivulja titra u području budućnosti, za razliku od ispitanih kratkih nizova od 10 do 16 članova gdje je ona praktički samo horizontalna.



Slika 4.32. Primjer testiranja modela $ARIMA(p,q,d=2,1,1)$ s diferenciranjem izvornog niza duljine 105 članova i s prognozom za narednih pet članova (gore) i unutarnji ustroj prognostičkog procesa (dolje).

Dakle, model $ARIMA(p,q,d=1,1,1)$ s diferenciranjem izvornog vremenskog niza, *kod kratkih vremenskih nizova* daje prognozu koja praktički održava nivo zadnje izmjerene točke. Kako s protekom godina bude rasla duljina niza, postepeno će se povećavati odstupanja prognoziranih točaka u odnosu na zadnju izmjerenu točku. Iako ovo izgleda obeshrabrujuće, pogleda li se još jednom desni dijagram na slici 4.30., vidi se da je model $ARIMA(p,q,d=1,1,1)$ savršeno prognozirao stagnaciju u broju registriranih vozila koja je trajala od 2008. do 2013. godine.

4.1.2.7. Konačan zaključak

Provedena razmatranja odnose se na prognoze broja vozila. S obzirom na to da su ukupne emisije izravno proporcionalne broju vozila⁶⁷, izvedeni zaključci zacijelo će vrijediti i za emisije. U tom bi smislu preporuke za izbor prognostičkih modela vremenskih nizova koji sadrže manje od približno dvadeset kronološki poredanih podataka bile sljedeće:

- (1) U uvjetima normalnog, postepenog rasta (promatrane pojave) najboljim se smatra model $ARIMA(p,q,d = 1,1,0)$. Razlike između njega i modela $ARIMA(p,q,d = 1,0,0)$ su neznatne.
- (2) Ako prognozom treba obuhvatiti i izvanredna stanja kao što je npr. višegodišnja stagnacija prognozirane pojave, dobre rezultate daje model $ARIMA(p,q,d = 1,1,1)$.
- (3) U slučajevima zadržavanja trenda, dobre prognoze daju regresijski modeli. Kod primjene polinoma, za dobre rezultate stupanj polinoma iznosi 1 ili 2, veoma rijetko dostiže brojku tri⁶⁸.

4.1.3. PODMODEL 2: Scenarijski podmodel

Svrha ovog podmodela je opisivanje difuzije novih tehnologija (hibridnih i električnih vozila) u tržište motornih vozila, odnosno u područje prvih registracija vozila kategorije M1.

4.1.3.1. Matematičko modeliranje difuzije novih tehnologija

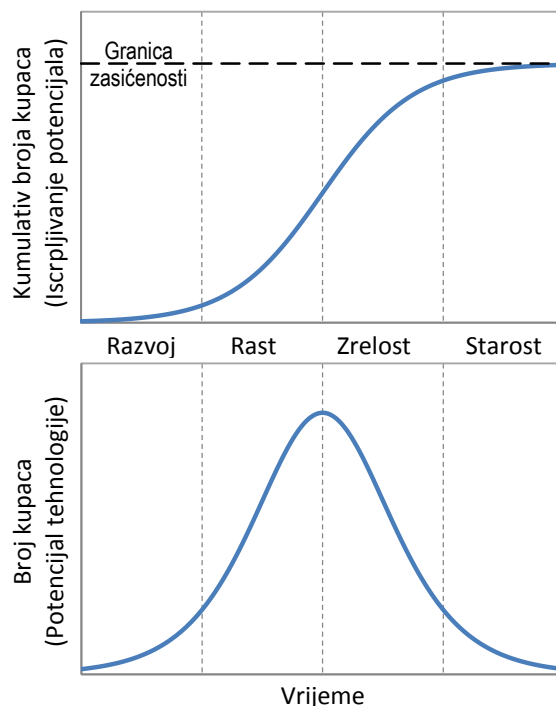
U brojnim je radovima pokazano da se prirodni rast mnogih pojava može opisati S-krivuljama. Matematički je te krivulje 1838. g. prvi put formulirao belgijski matematičar P.-F. Verhulst⁶⁹ [80]. Fisher i Pray [81] su već 1971. pokazali da su modeli koji počivaju na S-krivuljama jako prilagodljivi te da vrlo dobro opisuju difuzije novih proizvoda, ilustrirajući to primjerima tržišnog istiskivanja prirodnih vlakana sintetičkim, kože plastikom, prirodnog kaučuka sintetičkom gumom. S-krivulje su se pokazale učinkovitim alatom za praćenje i

⁶⁷ Uz nužne korekcije koje se odnose na emisijsku strukturu vozila i prijeđeni put.

⁶⁸ S povećanjem stupanja regresijskog polinoma raste koeficijent determinacije R^2 i opada zbroj kvadrata pogrešaka što bi moglo navesti na pogrešan zaključak o dobroj prilagodbi regresijske krivulje stvarnim podacima. Naime, između točaka podataka regresijska krivulja vijugavo i naglo mijenja svoj nagib pa na rubovima intervala potpuno pogrešno pokazuje smjer u kojem će se pojava nastaviti izvan intervala. Koeficijent determinacije vrijedi samo za linearnu regresijsku funkciju. Ako se primjenjuje na nelinearne funkcije, točnost mu rijetko dostiže treću decimalu [67]. Međutim, ovdje je dovoljna i točnost od samo dvije decimale.

⁶⁹ Verhulst (1804. – 1849.) je 1838. objavio *Essai sur le principe de population* (*Esej o zakonu rasta populacije*) u kojem je, osim matematičkog opisa, predvidio i gornju granicu rasta populacije (u jednadžbama (4.27.) do (4.30.): kapacitet tržišta M).

predviđanje najrazličitijih procesa kao što su npr. rast bakterija, širenje zaraznih bolesti, životni ciklusi inovacija i novih tehnologija, njihova difuzija u postojeće tržište itd. Povijest istraživanja difuzije inovacija i osnove tog procesa opisao je još 1962. godine Rogers [82]⁷⁰. Meade i Islam u svom radu [83] iz 1988. identificirali su čak 29 različitih modela pogodnih za prognoziranje difuzije novih tehnologija. Vrlo dobre i detaljne preglede S-modela, potkrijepljene primjerima, dali su također Oh (1988.) [84], Radas (2005.) [85], Sokele (2008.) [86], Kucharavy i De Guio (2011.) [87], a efekte primjene poticajnih politika pokazali su Mercure et al. (2014.) [88]. Najpoznatiji je model konzultantske tvrtke A. D. Little⁷¹ koji razlikuje četiri faze: razvoj, rast, zrelost i starost⁷² (slika 4.33).



Slika 4.33. Koncept S-krivulje: četiri faze životnog vijeka nove tehnologije⁷³

Logistički model. S-krivulja $L(t)$ opisuje porast broja korisnika u promatranom vremenskom intervalu, u zatvorenom tržištu bez utjecaja bilo kakvog drugog proizvoda. Model definiraju tri parametra: M - kapacitet tržišta (broj prodanih jedinica), a - parametar rasta i b - parametar vremenskog pomaka. Jednadžba glasi [86]:

$$L(t, M, a, b) = \frac{M}{1 + e^{-a(t-b)}} \quad (4.27)$$

Prva derivacija (zvonolika krivulja na slici 4.33. jednaka je:

$$L'(t) = \frac{dL(t)}{dt} = \frac{a \cdot M \cdot e^{-a(t-b)}}{[1 + e^{-a(t-b)}]^2} \quad (4.28)$$

Točka infleksije određuje se iz uvjeta $L''(t) = d^2L(t)/dt^2 = 0$ za $t = b$, a ako je $a > 0$ u toj je točki i maksimum prve derivacije jednak:

⁷⁰ Peto izdanje njegove knjige objavljeno je 2003. g.

⁷¹ Mock, [42], str. 10.

⁷² Osnovu svih ovih modela čini proces evolucije koji se sastoji od tri faze: nastajanja, rasta i zasićenja.

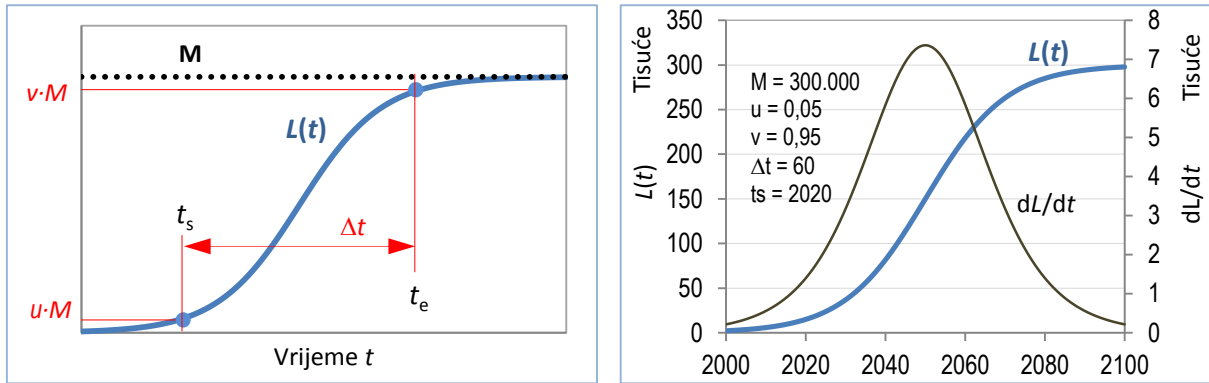
⁷³ Vlastiti prikaz po uzoru na [89], str.32 i 66; [90], str. 578; [91], str. 50; [92].

$$\max L'(t) = \max \frac{dL(t)}{dt} = \frac{a \cdot M}{4} \quad (4.29)$$

Vrijednost modelske krivulje u točki infleksije je: $L(b) = \frac{M}{2}$

U slučaju simetričnih točaka u i v , tj. ako je $u = 1 - v$, jednačba logističkog modela S-krivulje kroz dvije točke glasi (vidi oznake na slici 4.34) [86]:

$$L(t, M, t_s, \Delta t, u) = \frac{M}{1 + \left(\frac{1}{u} - 1\right)^{\frac{1-2(t-t_s)}{\Delta t}}} \quad (4.30)$$



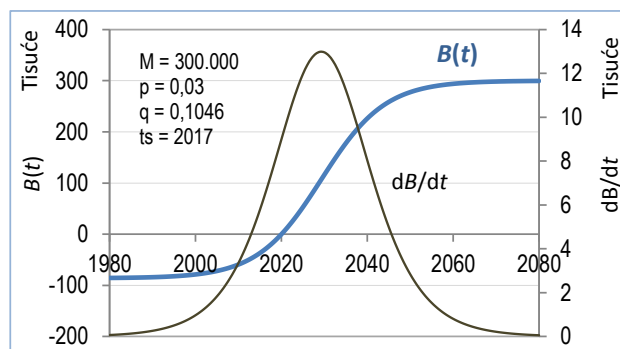
Slika 4.34. Krivulja rasta logističkog modela $L(t)$ definirana parametrima M , t_s , Δt , u i v [86]

Bass-ov model. Za razliku od logističkog modela, Bass-ov model omogućuje nagli porast u početnoj točki t_s i brže napreduje prema asimptotskoj vrijednosti M . Jednačba modela glasi [86]⁷⁴:

$$B(t, M, p, q, t_s) = M \cdot \frac{1 - e^{-(p+q)(t-t_s)}}{1 + \frac{q}{p} \cdot e^{-(p+q)(t-t_s)}} \quad (4.31)$$

Kad je za zadanu početnu točku t_s raspoloživ vremenski razmak Δt malen, logistički model ne može dati rješenje jer nema dovoljno vremena za formiranje krivulje. U takvim slučajevima Bass-ov model, uz odgovarajući odabir parametara p i q , daje rješenje i postiže ciljenu ordinatu na desnoj granici promatranog vremenskog intervala (vidi sliku 4.35.)

⁷⁴ Bass-ov model je također primijenjen u sljedećim radovima koji se bave modelima za prognožiranje tržišne difuzije novih proizvoda: Packey (1993.) [93], Sood et al. (2009) [94]. Međutim matematički izrazi i popratna objašnjenja su najjasniji u radu Sokela [86].



Slika 4.35. Primjer krivulje rasta Bass-ovog modela $B(t)$ i njena prva derivacija [86]

4.1.4. PODMODEL 3: Model za upravljanje emisijama

Ovaj model upravlja emisijama navodeći ih prema postavljenom cilju (godišnja količina emisija) u određenoj točki vremenske skale (kalendarska godina).

4.1.4.1. Opis modela

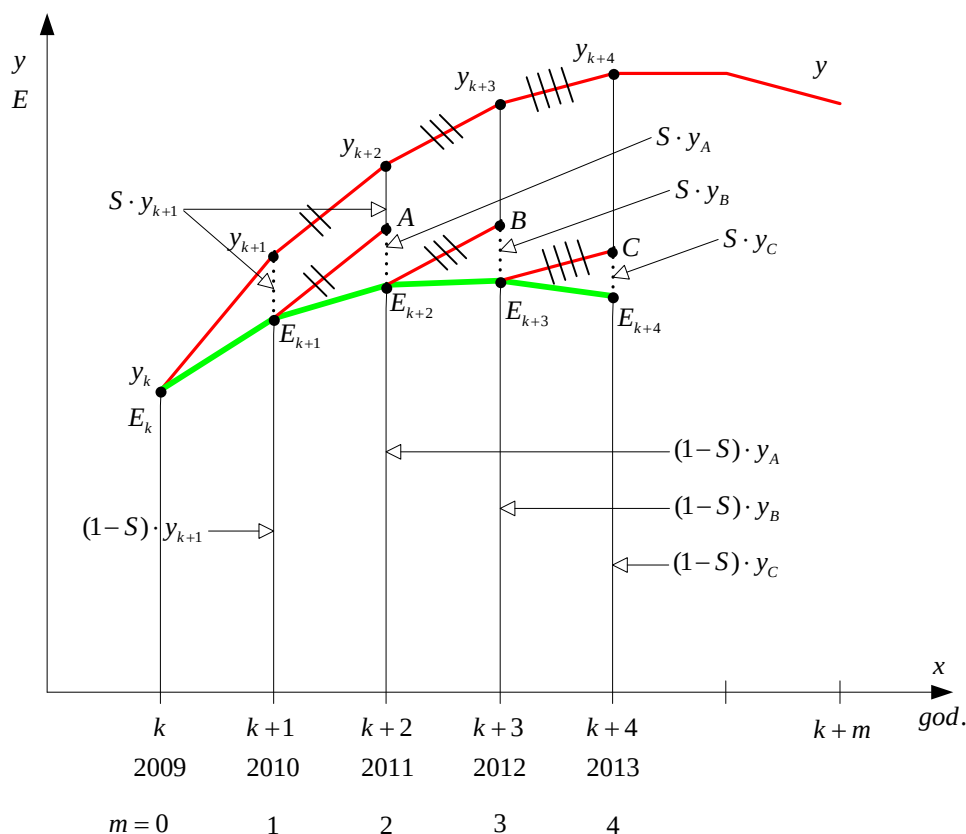
Promatra se promjena količine pojedine tvari koju u zrak ispušta flota motornih vozila. Na temelju podataka o proteklim godinama treba izraditi model predviđanja za naredno razdoblje. Za svaku od proteklih godina referentno je stanje na dan 31. prosinac u 24:00. Poznati su podaci o broju vozila, a za posljednje dvije godine i podaci o ukupnim godišnjim emisijama E (t/god) promatrane tvari, ili o *prosječnoj* emisijskoj razini vozila⁷⁵ (Euro 1, 2, 3, 4, ...). Izradit će se matematički model koji će omogućiti predviđanje štetnih emisija u budućnosti, ako je zbog godišnjeg obnavljanja flote⁷⁶ ukupna godišnja emisija promatrane tvari svake godine manja za isti iznos S (%) u odnosu na emisiju koja bi bila ako bi vozila toga obnovljenog dijela flote imala istu prosječnu emisiju po vozilu kao i cjelokupna flota iz prethodne godine.

U dijagramu na slici 4.36. ucrtane su točke $y_k, y_{k+1}, y_{k+2}, \dots$ **broja** godišnje registriranih vozila u proteklom razdoblju. Kroz te točke je provučena **crvena** aproksimacijska krivulja y . Krivulja y prikazuje broj registriranih motornih vozila u floti na kraju promatrane k -te godine (2009.) te njihov prognozirani broj na kraju narednih godina: $(k + 1), (k + 2), (k + 3) \dots$. Za prve dvije godine na krivulji y , tj. za y_k, y_{k+1} (na slici: 2009. i 2010. godina) poznati su podaci o broju vozila i o ukupnoj emisiji svih vozila E_k, E_{k+1} , gdje je k redni broj točke tj. kalendarski broj godine.

Kad bi prosječna emisijska razina bila ista kao u početnoj k -toj godini (na slici: 2009.), tada bi krivulja y bila izravno proporcionalna emisiji E svih vozila. Radi jednostavnosti oznaka od sada nadalje smatra se da krivulja y predstavlja emisiju svih vozila kad bi ona imala emisijsku razinu kao u početnoj k -toj godini (u ovom slučaju u 2009.) te će ona biti nazvana „*nesmanjenom emisijom*“.

⁷⁵ Ako su poznati podaci o emisijama, tada će se moći prognozirati količine (t/god), a ako su poznate samo emisijske razine, proračunat će se relativne promjene (%) u odnosu na početnu godinu.

⁷⁶ U bilancu obnavljanoga dijela flote ulaze novoregistrirana vozila i vozila povučena iz prometa.



Slika 4.36. Shema izračuna u podmodelu za upravljanje emisijama
Oznake: y – broj vozila (crvena krivulja), E – emisije vozila y (zeleno krivulja)

Pretpostavke:

(P1): U svakoj godini jedno te isto vozilo napravi jednaki broj kilometara u jednakim uvjetima tj. ispusti u zrak istu količinu štetnih tvari.

Ako bi prosječna emisija svakog vozila obnovljenoga dijela flote u promatranoj godini bila jednaka prosječnoj emisiji vozila na kraju prethodne godine, tada ne bi bilo smanjenja emisija zbog novoregistriranih vozila, nego bi emisija svih registriranih vozila bila yizravno proporcionalna broju vozila, tj. **crvena** krivulja y predstavljala bi i ukupne emisije i broj vozila. Međutim, ako je prosječna emisija [kg/(vozilo×god)] obnavljanoga dijela flote svake godine niža za isti postotak S (%), tada će i ukupna emisija svih vozila biti niža (**zeleno** krivulja). Postavlja se pitanje kolika mora biti stopa prirasta S da bi se ukupna emisija E počela smanjivati?

S , % - stopa smanjivanja emisija (npr. 3 %) u odnosu na količinu emisija kad bi vozila na kraju 2010. imala istu prosječnu emisijsku razinu kao na kraju 2009. godine.

Iz dijagrama:

$$S = \frac{y_{k+1} - E_{k+1}}{y_{k+1}} = \frac{y_A - E_{k+2}}{y_A} = \frac{y_B - E_{k+3}}{y_B} = \dots$$

(P2): Stopa smanjivanja emisija S je konstantna u svim narednim godinama.

Opet se iz dijagrama dobiva (u ovim izrazima je S u obliku decimalnoga broja, a ne postotka):

$$E_k = y_k$$

$$E_{k+1} = y_{k+1} - S \cdot y_{k+1} = (1-S) \cdot y_{k+1}$$

$$E_{k+2} = (1-S) \cdot y_A = (1-S) \cdot (y_{k+2} - S \cdot y_{k+1})$$

$$\begin{aligned} E_{k+3} &= (1-S) \cdot y_B = (1-S) \cdot [y_{k+3} - (y_{k+2} - E_{k+2})] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+3} - y_{k+2} + (1-S) \cdot (y_{k+2} - S \cdot y_{k+1})] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+3} + y_{k+2} \cdot (-1+1-S) - (1-S) \cdot S \cdot y_{k+1}] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+3} - S \cdot y_{k+2} - S \cdot (1-S) \cdot y_{k+1}] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{k+4} &= (1-S) \cdot y_C = (1-S) \cdot [y_{k+4} - (y_{k+3} - E_{k+3})] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+4} - y_{k+3} + (1-S) \cdot \{y_{k+3} - S \cdot y_{k+2} - (1-S) \cdot S \cdot y_{k+1}\}] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+4} + (-1+1-S) \cdot y_{k+3} - (1-S) \cdot S \cdot \{y_{k+2} + (1-S) \cdot y_{k+1}\}] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+4} - S \cdot y_{k+3} - S \cdot (1-S) \cdot y_{k+2} - S \cdot (1-S)^2 \cdot y_{k+1}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{k+5} &= (1-S) \cdot y_D = (1-S) \cdot [y_{k+5} - (y_{k+4} - E_{k+4})] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+5} - y_{k+4} + (1-S) \cdot \{y_{k+4} - S \cdot y_{k+3} - (1-S) \cdot S \cdot [y_{k+2} + (1-S) \cdot y_{k+1}]\}] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+5} + (-1+1-S) \cdot y_{k+4} - (1-S) \cdot S \cdot \{y_{k+3} + (1-S) \cdot y_{k+2} + (1-S)^2 \cdot y_{k+1}\}] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+5} - S \cdot y_{k+4} - S \cdot (1-S) \cdot \{y_{k+3} + (1-S) \cdot y_{k+2} + (1-S)^2 \cdot y_{k+1}\}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{k+6} &= (1-S) \cdot [y_{k+6} + (-1+1-S) \cdot y_{k+5} - (1-S) \cdot S \cdot y_{k+4} - (1-S)^2 \cdot S \cdot y_{k+3} - (1-S)^3 \cdot S \cdot y_{k+2} - (1-S)^4 \cdot S \cdot y_{k+1}] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+6} - S \cdot y_{k+5} - S \cdot (1-S) \cdot y_{k+4} - S \cdot (1-S)^2 \cdot y_{k+3} - S \cdot (1-S)^3 \cdot y_{k+2} - S \cdot (1-S)^4 \cdot y_{k+1}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{k+6} &= (1-S) \cdot [y_{k+6} + (-1+1-S) \cdot y_{k+5} - (1-S) \cdot S \cdot y_{k+4} - (1-S)^2 \cdot S \cdot y_{k+3} - (1-S)^3 \cdot S \cdot y_{k+2} - (1-S)^4 \cdot S \cdot y_{k+1}] = \\ &= (1-S) \cdot [y_{k+6} - S \cdot y_{k+5} - S \cdot (1-S) \cdot y_{k+4} - S \cdot (1-S)^2 \cdot y_{k+3} - S \cdot (1-S)^3 \cdot y_{k+2} - S \cdot (1-S)^4 \cdot y_{k+1}] \end{aligned}$$

Opći oblik izraza za emisije u godini $(k+1)+m$:

$$E_{(k+1)+m} = (1-S) \cdot [y_{k+m+1} - S \cdot (1-S)^0 \cdot y_{k+m-0} - S \cdot (1-S)^1 \cdot y_{k+m-1} - S \cdot (1-S)^2 \cdot y_{k+m-2} - \dots]$$

ili:

$$E_{(k+1)+m} = (1-S) \cdot \left[y_{(k+1)+m} - S \cdot \sum_{j=1}^m (1-S)^{m-j} \cdot y_{k+j} \right] \quad (4.32)$$

$k+1$ = posljednja godina za koju postoje podaci

m = ukupan broj promatranih godina u budućnosti

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Primjer (vidi desnu tablicu):

$$k = 2009$$

$$m = 5$$

$k+1 = 2010$ (posljednja godina
za koju postoje podaci)

$(k+1)+m = 2015$ (posljednja
promatrana godina u budućnosti)

(*) samo u 2015. godini: $(k+1)+m = k+6$

God.	j	$k+j$
2010	1	$k+1$
2011	2	$k+2$
2012	3	$k+3$
2013	4	$k+4$
2014	5	$k+5$
2015(*)	(6)	$(k+6)$

4.1.4.2. Primjena podmodela

Pretpostavke (P1) i (P2), uvedene kod izvoda modela definiranog konačnim izrazom (4.32) uvelike bi smanjile njegovu praktičnu vrijednost. Međutim, one se mogu vrlo jednostavno zaobići, a da se ne naruši točnost modela.

(a) Prosječan godišnji prevoženi put (pretpostavka (P1))

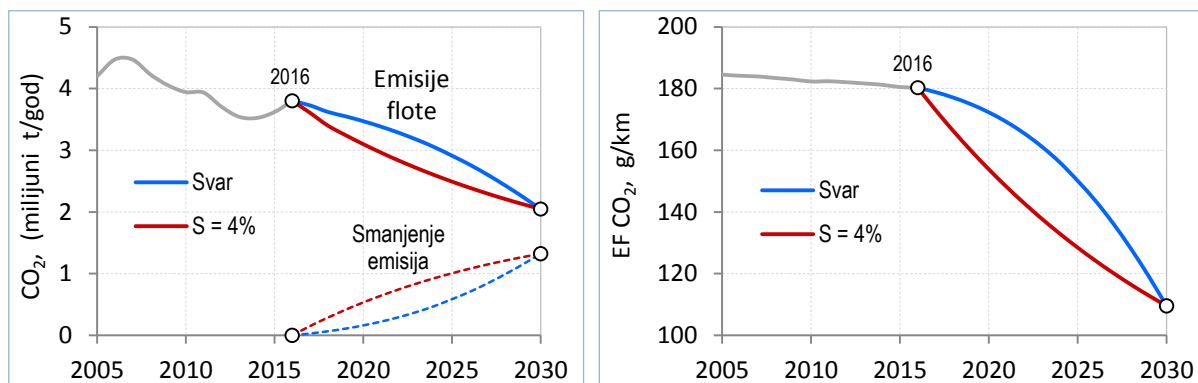
U (P1) je pretpostavljeno da je prosječan godišnji prevoženi put isti u svim prognostičkim godinama. Ovo ograničenje se izbjegava tako da se prosječan godišnji put vozila u zadnjoj godini za koju postoje podaci (u ovom slučaju 2016.) proglašuje *referentnim*, te se emisije u svim prognostičkim godinama izračunaju za taj *referentni* put, a zatim se preračunaju na bilo koji prosječan godišnji put, odnosno na onaj određen modelom za prognoziranje (vidi sliku 4.38.)

(b) Stopa smanjenja emisija S (pretpostavka (P2))

U (P2) je pretpostavljeno da je stopa S konstantna. Međutim, kod praktične primjene ovog izraza izračun emisija provodi se u koracima, za svaku godinu posebno. Pretpostavi li se da je za promatrano razdoblje (od 2016. do 2030.) provedeno toliko izračuna koliko prognostičkih kalendarskih godina razdoblje sadrži. Neka je stopa S u svakom izračunu drugačija. Neka su rezultati svakog izračuna zapisani u posebnu tablicu. Tako je formirano toliko jednako strukturiranih tablica koliko prognostičkih godina obuhvaća promatrano razdoblje⁷⁷. Neka stopa S poprima vrijednosti od najmanje do najveće i to tako da one odgovaraju zakonu S -krivulje, npr. logističkom modelu. Najveća vrijednost stope S jednaka je upravo onoj kojom se u 2030. godini postiže ciljana emisija. Sada se iz tablica s rezultatima (poređanim prema rastućim vrijednostima stope S) može formirati nova tablica, na način da se iz svake tablice redom uzme rezultat za po jednu narednu godinu. Ova nova tablica ne narušava točnost izvedenih izraza, u 2030. godini se postiže ciljana emisija, a vrijednosti godišnjih emisija i vrijednosti emisijskog faktora flote postepeno opadaju prema svojim krajnjim vrijednostima (u 2030. godini, slika 4.37) i dobro se poklapaju s analizama u poglavlju 5. Isti će se rezultat dobiti ako se provede samo jedan izračun, a u svakom koraku se primijeni drugačija vrijednost stope S .

Dakle, stopa S može u svakom proračunskom koraku, tj. za svaku kalendarsku godinu, imati drugačiju vrijednost. Dobri rezultati se dobivaju ako u promatranom razdoblju stopa S raste po zakonu difuzije novih tehnologija u tržište postojećih proizvoda, kao što je primjerice logistički model prema jednadžbi (4.30).

⁷⁷ U primjeru koji slijedi zadnja godina za koju postoje podaci je 2016. a promatrano razdoblje završava u 2030. Broj prognostičkih godina je $2030 - 2016 = 14$. Dakle, broj tablica jednak je 14.



Slika 4.37. Prognoze emisija flote⁷⁸ poslije 2016. (lijevo) i emisijskog faktora flote (desno) izračunate s konstantnom ($S = 4\%$) i s varijabilnom (S_{var}) godišnjom stopom smanjivanja.

Primjer:

Zadatak. Treba izračunati emisije ugljičnog dioksida CO_2 hrvatske flote M1 do 2030. godine, za različite pretpostavljene stope S godišnjeg smanjivanja. Poznati su broj vozila i emisije od 2005. do 2016. godine.

Rješenje. Metodom ARIMA prognozirani su od 2018. do 2030. broj vozila (slika 4.26) i prosječan godišnji put jednog vozila (slika 4.38). Obje prognoze se vrlo dobro poklapaju s regresijskim funkcijama visokih koeficijenata determinacije. Raspisivanjem jednadžbe (4.32) u Excelu su izračunate emisije CO_2 za tri slučaja (slika 4.39):

- **(EF_2016):** obnavljana flota održava vrijednost emisijskog faktora cjelokupne flote M1 na razini 2016. godine
- **(Trend EF):** obnavljana flota zadržava postojeći trend⁷⁹ emisijskog faktora cjelokupne flote M1 pokazan na slici 4.18.
- **(Svar):** varijabilna stopa smanjivanja emisija obnavljanog dijela flote raste po zakonu S-krivulje uz primjenu logističkog modela difuzije (jednadžba (4.30)) s parametrima: $M = 1$, $u = 0,007$, početna širina vremenskog intervala $\Delta t = 90$ i $t_s = 2016$. Ciljana vrijednost emisija u 2030. godini postavljena je na 2,5 milijuna tona CO_2 . Cilj je dostignut tako da je u Excelu primijenjena funkcija „Goal Seek“ kojom je u tu svrhu početna vrijednost vremenskog intervala na slici 4.34. promijenjena na iznos od $\Delta t = 111,13$ godina. Pritom se stopa smanjivanja emisija u prognostičkom razdoblju povećavala od 0,70 % u 2016. godini do 2,40 % u 2030.

Emisijski faktor EF_{CO_2} za ova tri slučaja izračunat je kao:

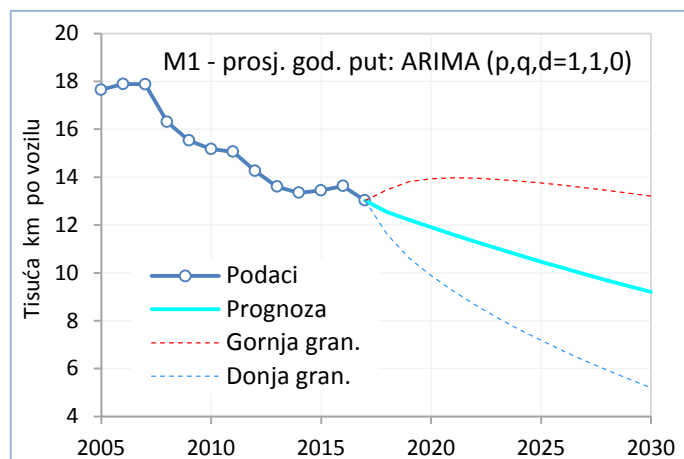
$$EF_{CO_2} = \frac{(emisija\ CO_2)}{(broj\ vozila) \times (prosječan\ godišnji\ put\ vozila)}, \frac{g}{km}$$

Zahvaljujući primjeni modela difuzije (novih pogonskih sustava HEV, PHEV, BEV u područje prvih registracija), emisijski faktor postepeno opada (plava krivulja na na slici 4.40.).

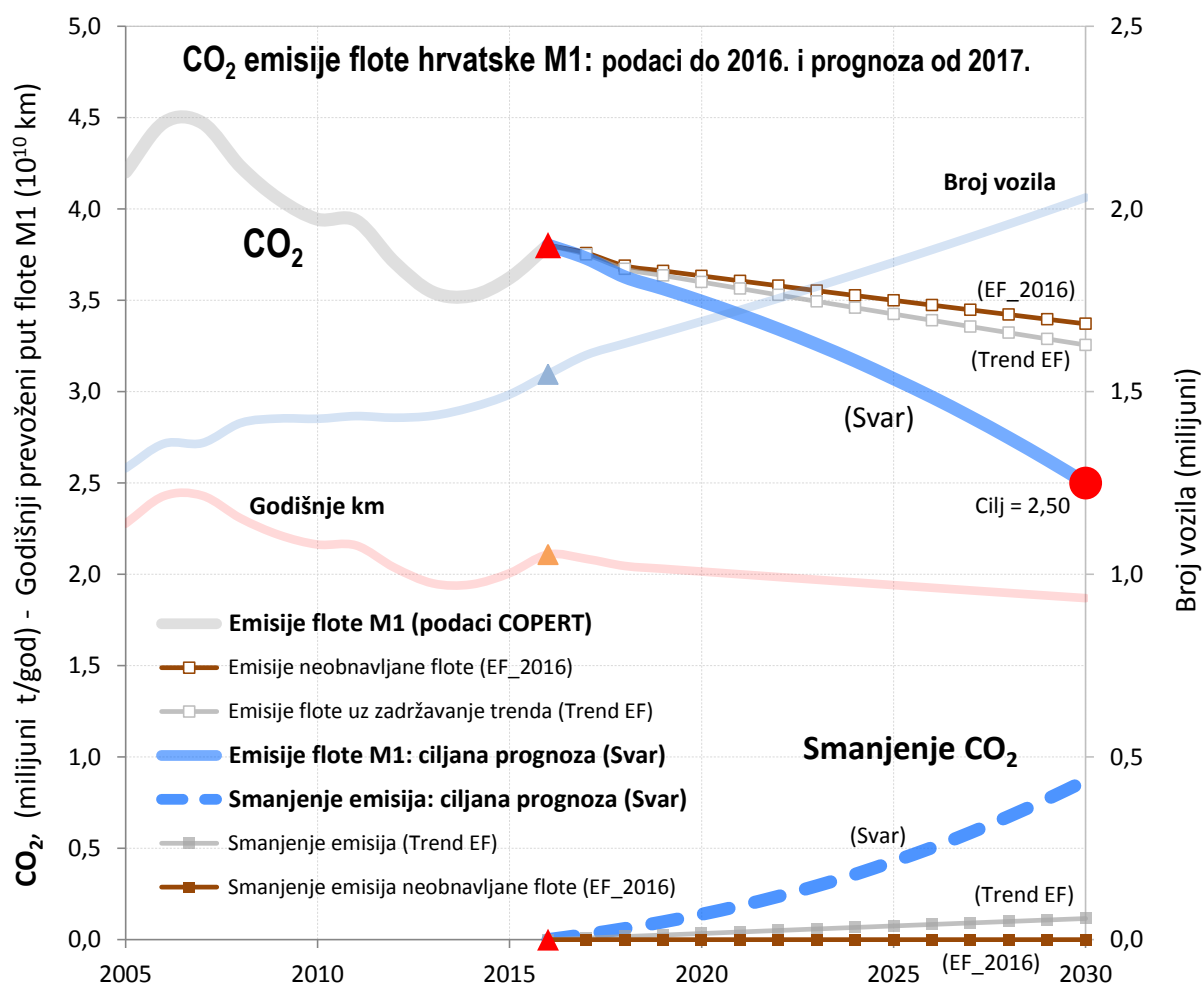
⁷⁸ Smanjenje emisija je razlika koja bi se ostvarila u odnosu na emisije koje bi flota imala kad bi emisijski faktor ostao jednak onome iz 2016. godine.

⁷⁹ Primijenjen je kvadratni polinom koeficijenta determinacije $R^2 = 0,9872$.

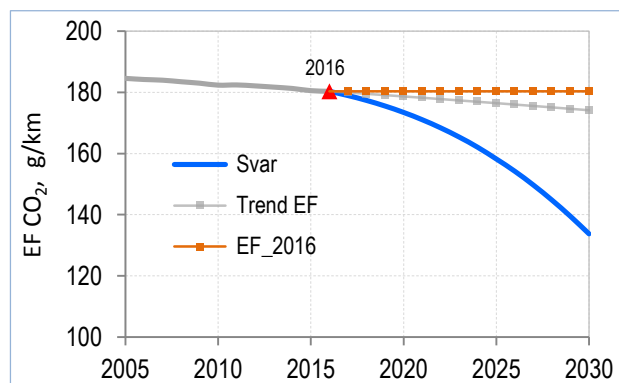
Općenito, variranjem parametara logističkog modela difuzije, stopa smanjivanja emisija S u ciljnoj 2030. godini navodi se prema željenoj vrijednosti. U stvarnom životu ova će stopa ovisiti o intenzitetu povećanja i obnavljanja flote vozila, o emisijskoj strukturi obnavljanoga dijela, o odumiranju postojeće flote te o prosječnom godišnjem putu vozila. Na sve ovo utječe u prvom redu kretanje BDP-a [95], dok će mjere poticajnih politika Vlade imati slabiji učinak [44].



Slika 4.38. Prognosa prosječnog godišnje prevoženog puta metodom ARIMA



Slika 4.39. Prognosa emisija CO₂ flote M1 u RH do 2030. godine



Slika 4.40. Emisijski faktor flote M1 za tri razmatrana slučaja

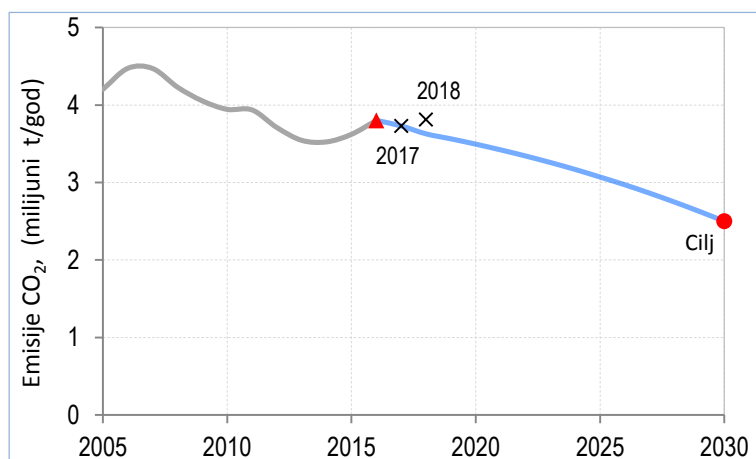
4.1.5. INDIKATORI emisija flote

Emisije flote prate se pomoću tri indikatora:

- **Emisijskog faktora** ugljikovog dioksida cjelokupne flote M1: $EF_{CO_2}(M1), g/km \dots$ (Indikator se izračunava programom COPERT, a ulazni se podaci nalaze u bazi vozila CVH.)
- **Broja vozila** u floti M1 (Podaci se nalaze u bazi vozila CVH.)
- **Prosječnog godišnjeg puta** po vozilu M1, km/voz. (Podaci se nalaze u bazi vozila CVH.)

Emisije se prate na sljedeći način (vidi sliku):

1. Za posljednju cjelovitu godinu, za koju postoje uređeni podaci, izračunavaju se indikatori.
2. Upravljačkim se programom (podmodel 3) provjerava slijede li emisije CO₂ flote M1 u promatranoj godini prognostičku krivulju usmjerenu prema parcijalnom cilju flote M1 u 2030. godini.
3. Emisije **stakleničkih plinova** cjelokupnog cestovnog transporta računaju se pomoću izraza (4.34).



Slika 4.41. Hipotetički primjer praćenja odstupanja stvarnih emisija flote (crni križići) od (plave) prognoze upravljačkog modela koja vodi prema cilju. Emisije u 2018. godini premašile su prognostičku vrijednost za približno 5 %.

Osim praćenja emisija flote kao cjeline, može se pratiti i odstupanje svakog indikatora posebno od krivulje koja vodi prema zadanom cilju, a koja je izračunata prognozom emisija flote u jednoj od prošlih godina. Npr. točke za $EFCO_2$ bi u promatranim godinama trebale pratiti plavu krivulju na slici 4.40.

4.2. Preračunavanje stakleničkih plinova na ekvivalent CO_2

Budući da svi staklenički plinovi ne daju jednak doprinos globalnom zatopljenju, IPCC je 1990. godine na temelju rezultata istraživanja uveo pojam *potencijala globalnog zatopljenja GWP* (engl. *Global Warming Potential*). *GWP* je faktor koji pokazuje koliko puta je doprinos globalnom zatopljenju jedne tone nekog stakleničkog plina veći od doprinosa jedne tone CO_2 . Time je omogućeno da se sve emisije stakleničkih plinova iskazuju u istoj jedinici mjere: tonama CO_2 ekvivalenta [$t\ CO_2\text{-ekv}$]. Potencijalni utjecaj svakog stakleničkog plina na globalno zatopljenje procjenjuje se za budućih 25, 100 ili 500 godina. Za izvještavanje o emisijama stakleničkih plinova prema Protokolu iz Kyota primjenjuje se horizont od 100 godina a odgovarajući *potencijal globalnog zatopljenja* označava se sa GWP_{100} . Masa stakleničkog plina izražena kao ekvivalent CO_2 izračunava se prema izrazu:

$$masa\ CO_2e = masa\ stakleničkog\ plina \times GWP_{100} \quad (4.33)$$

S obzirom na to da je Zemljina atmosfera dinamički sustav, *GWP* se uvijek iznova procjenjuje, a rezultati procjena se objavljuju u redovitim izvješćima na internetskoj stranici IPCC-a⁸⁰. Zadnja procjena objavljena je u izvješću IPCC Fifth Assessment Report, 2014 (AR5). Vrijednosti GWP_{100} prema tom izvješću pokazane su u tablici 4.4. Od svih sastojaka ispušnih plinova motora s unutarnjim izgaranjem u toj su tablici navedena samo tri staklenička plina: CO_2 , CH_4 i N_2O . Homologacijskim propisima oksidi dušika ograničeni su skupno kao (NO_x). Prema Van Basshuysenu [3], str. 935, pojam dušikovi oksidi obuhvaća sedam oksida: NO , NO_2 , NO_3 , N_2O , N_2O_3 , N_2O_4 i N_2O_5 . Najvažniji predstavnici ovih oksida su dušikov monoksid NO i dušikov dioksid NO_2 . Omjer NO/NO_2 iznosi u sirovim emisijama Ottovog motora (prije katalizatora) više od 0,99. Najveća koncentracija NO_x javlja se kod blago siromašne smjese, tj. kod 5 % do 10 % viška zraka u odnosu na stehiometrijsku smjesu.

Tablica 4.4. Staklenički plinovi u ispuhu motora cestovnih vozila i njihove vrijednosti Potencijala globalnog zatopljenja GWP_{100} u odnosu na CO_2 [96]

Staklenički plin	Potencijal globalnog zatopljenja <i>GWP</i> za horizont od 100 godina		
	Second Assessment Report (SAR)	Fourth Assessment Report (AR4)	Fifth Assessment Report (AR5)
CO_2	1	1	1
CH_4	21	25	28
N_2O	310	298	265

⁸⁰ http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml

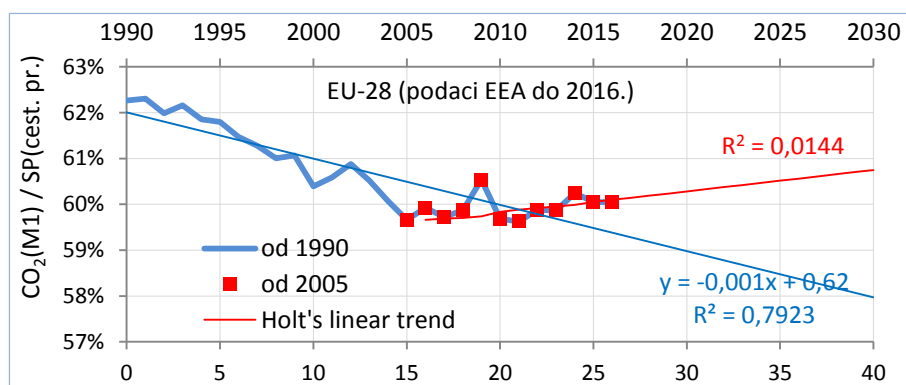
Staklenički plinovi N₂O i CH₄. Prema podacima Europske agencije za okoliš EEA, u zemljama EU-28 emisije N₂O i CH₄ vozila kategorije **M1** u razdoblju od 2005. do 2016., izražene u tonama ekvivalenta CO₂, iznose u prosjeku:

emisije N₂O = 1,0 % emisija CO₂, emisije CH₄ = 0,20 % emisija CO₂.

Omjer emisija flote M1 i cjelokupne flote cestovnih vozila. Prema istom izvoru⁸¹ u zemljama EU-28 emisije CO₂ vozila kategorije M1, u odnosu na ukupne emisije stakleničkih plinova od cestovnog transporta, iznose⁸¹ u prosjeku:

$$\frac{\text{emisije CO}_2 \text{ (M1)}}{\text{emisije GHG (cestovni transport)}} = 60,6\% \text{ u razdoblju od 1990. do 2016.} \quad (4.34)$$

$$59,9\% \text{ u razdoblju od 2005. do 2016.}$$



Slika 4.42. Omjer emisija CO₂ vozila kategorije M1 i ukupnih emisija stakleničkih plinova cestovnog transporta (izraženih kao maseni ekvivalent CO₂) u zemljama EU-28. Ucrtni su pravci trenda⁸² za cijelo razdoblje od 1995. do 2016. (plava krivulja) i od 2005. (crvene točke).

Iz dijagrama na slici 4.42. se vidi da do 2030. godine trend od 1990. vrlo malo odstupa od vrijednosti 60 % (koeficijent korelacije $R = \sqrt{0,7923} = 0,89$), pa su emisije cjelokupnog cestovnog transporta procjenjivane upravo s tim omjerom.

Prognoza. Može se očekivati da će u budućnosti ovaj omjer u razvijenim zemljama imati tendenciju opadanja, jer je u njima difuzija novih pogonskih sustava najjača i odvija se prvenstveno u kategoriji vozila M1. Teretna vozila i autobusi u međumjesnom i međunarodnom transportu zasigurno će, barem do 2030. godine, biti pogonjeni Dieselovim motorima. Elektrifikacija pogonskih sustava teških vozila je još uvijek opterećena neizvjesnostima. Detaljan pregled alternativnih pogonskih sustava autobusa (hibridnih, baterijskih i gorivnih članaka) [97] pokazao je da nisu prevladane nedoumice u pogledu izbora konfiguracije sustava, a ukupni troškovi po kilometru su znatno veći. Do sličnih zaključaka su došli Earl et al. [98] u svojoj analizi električnih teških teretnih vozila u EU.

⁸¹ Izračunato na temelju podataka objavljenih na stranici EEA greenhouse gas - data viewer:

<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>

⁸² Holtov linearni trend izračunat je u Excelu, dodatkom *Real Statistics Using Excel* [72].

Pokazali su koje su otegotne okolnosti u dostizanju ciljeva o smanjenju emisija stakleničkih plinova do 2050. godine, preuzetih Pariškim sporazumom. Da bi se ispunili ti ciljevi, Europa će za pogon električnih vozila trebati oko 10 % današnje proizvodnje električne energije. Poveća li se pak za sada nedostatan doseg električnih vozila (ugradnjom baterije veće mase) opada njihova korisnost, pogonski troškovi su tek neznatno niži od troškova klasičnih teških vozila pokretanih Dieslovim motorima, a mreža punionica je još daleko ispod zadovoljavajuće razine. Ukratko, omjer emisija stakleničkih plinova vozila kategorije M1 i cjelokupne flote cestovnih vozila u budućnosti će također biti podložan promjenama.

4.3. Nesigurnost

Rezultati svake procjene emisija opterećeni su neizvjesnostima. Budući da su prave emisije nepoznate, nemoguće je izračunati točnost procjena. Međutim, može se odrediti preciznost procijenjenih emisija. Ova procjena također pruža uvid u točnost, pod uvjetom da metodologija koja se primjenjuje za procjenu emisija cestovnog transporta predstavlja pouzdanu sliku stvarnosti. Pogreške pri izradi inventara emisija potječu iz dva glavna izvora⁸³:

1. Sustavne pogreške metodologije proračuna emisija. To su u prvom redu pogreške u određivanju emisijskih faktora, ali i ostali elementi povezani s emisijama (npr. modeliranje hladnog starta itd.).
2. Pogreške u ulaznim podacima koje daje kompajler programskog paketa. To se odnosi na unaprijed zadane (engl. *default*) podatke o aktivnostima vozila (npr. prosječan godišnji prevoženi put, prosječne brzine vožnje i udjeli po tipovima prometnica itd.), na svojstva goriva te na uvjete okoliša.

4.3.1. Definicije i pojmovi

Pojmovi povezani s analizom nesigurnosti uključuju⁸⁴: *nesigurnost*, *točnost*, *preciznost* i *varijabilnost*. U nastavku su abecednim redoslijedom dane definicije i opisi ovih i s njima povezanih važnijih pojmova.

Bias je nedostatak točnosti. Bias se u slučaju **sustavne pogreške** može pojaviti zbog ne obuhvaćanja svih relevantnih uključenih procesa ili zato što dostupni podaci nisu reprezentativni za sve situacije u stvarnome svijetu ili zbog pogreške instrumenta.

Interval pouzdanosti. Stvarna vrijednost je nepoznata konstanta, npr. godišnja emisija u nekoj zemlji. Interval pouzdanosti je raspon u kome će se ta vrijednost nalaziti uz odabranu vjerojatnost. U inventarima stakleničkih plinova koristi se interval pouzdanosti od 95 %, što znači da će se u 95 % svih slučajeva stvarna vrijednost nalaziti u intervalu pouzdanosti.

Nesigurnost je definirana kao nedostatak znanja o stvarnoj vrijednosti varijable koja se može opisati kao *funkcija gustoće vjerojatnosti*⁸⁵ PDF (engl. **Probability Density Function**) koja

⁸³ EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 – Last Update June 2017; 1.A.3.b.i, 1.A.3.b.ii, 1.A.3.b.iii, 1.A.3.b.iv Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motor cycles; potpoglavlje 4.5.2 Uncertainty of the emission inventory [62]

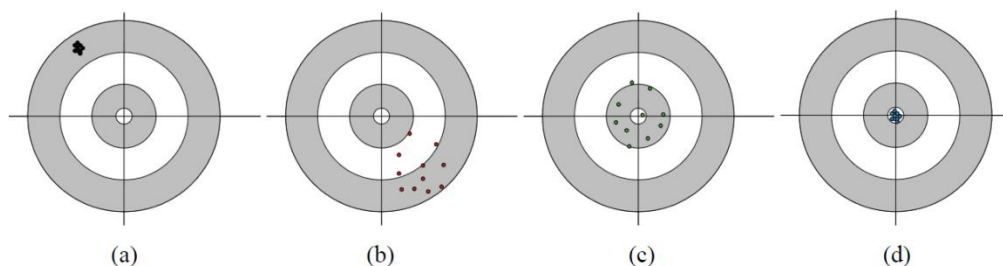
⁸⁴ 2006 IPCC Guidelines, Vol. 1, Chapter 3: Uncertainties [99], str. 3.7-3.8.

karakterizira raspon i vjerojatnost mogućih vrijednosti⁸⁶. Nesigurnost ovisi o saznanjima analitičara, koja pak ovise o kvaliteti i količini primjenjivih podataka, kao i o poznavanju temeljnih procesa i metoda zaključivanja.

Preciznost je podudarnost između ponovljenih mjerenja iste varijable. Bolja preciznost znači manje slučajne pogreške. Preciznost je neovisna o točnosti.

Slučajne pogreške su slučajne varijacije iznad ili ispod srednje vrijednosti. Slučajna pogreška je obrnuto proporcionalna preciznosti. Uobičajeno je da se slučajna pogreška referencira na srednju vrijednost, no srednja vrijednost može biti pristrana ili nepristrana. Dakle, slučajna pogreška se razlikuje od sustavne pogreške.

Točnost je podudarnost između stvarne vrijednosti i prosjeka ponovljenih izmjerenih promatranja ili procjena varijable. Točno mjerenje ili predviđanje nema ni pristranosti ni sustavne pogreške.



Slika 4.43. Ilustracija točnosti i preciznosti: (a) netočno, ali precizno, (b) netočno i neprecizno, (c) točno, ali neprecizno, (d) točno i precizno. [99]⁸⁷

Varijabilnost je heterogenost varijable tijekom vremena, prostora ili među članovima populacije. Varijabilnost može nastati, na primjer, uslijed konstrukcijskih razlika među izvorima emisija (međuinstitucionalna ili prostorna varijabilnost) ili zbog razlika u njihovim radnim uvjetima (varijabilnost unutar postrojenja). Varijabilnost je svojstvo sustava ili prirode, a ne analitičara.

4.3.2. Utjecajne varijable emisija cestovnog transporta

U studiji o nesigurnosti procjena cjelokupnog inventara emisija cestovnog transporta, Kouridis et al. [46] podijelili su nesigurnosti u četiri skupine: 1. nesigurnosti broja vozila i njihove emisijske strukture, 2. nesigurnosti emisijskih faktora i parametara, 3. nesigurnosti varijabla prevoženoga puta i 4. nesigurnosti ostalih parametara i varijabla.

Nesigurnosti broja vozila i njihove emisijske strukture analizirane su na primjeru Italije i Poljske, prikupljanjem podataka iz različitih izvora. U vrijeme izrade studije (objavljena je

⁸⁵ U teoriji vjerojatnosti, gustoća vjerojatnosti (engl. probability density function - PDF) je funkcija koja daje relativnu vjerojatnost da kontinuirana slučajna varijabla ima određenu vrijednost iz skupa mogućih vrijednosti. Vidi opširnije u: https://en.wikipedia.org/wiki/Probability_density_function

⁸⁶ U ovom slučaju se PDF koristi za procjenu neizvjesnosti nepoznate vrijednosti ukupnih emisija, kao i emisija i aktivnosti vezanih uz određene kategorije. [99], str. 3.7-3.8.

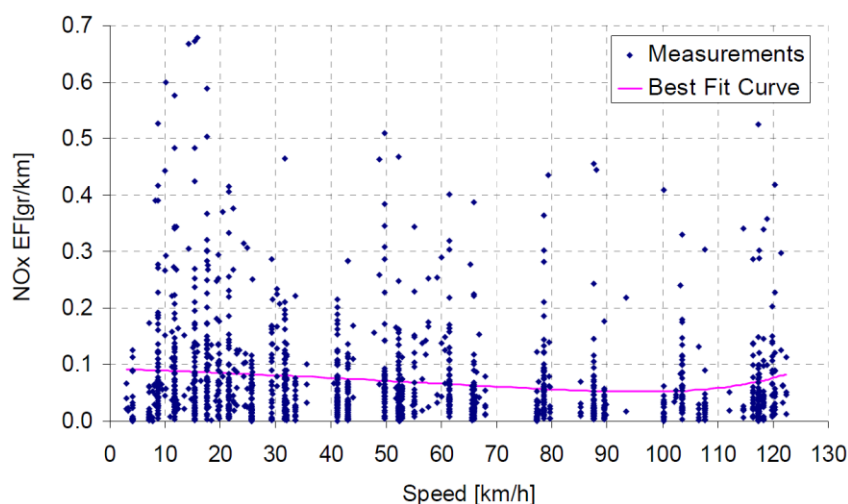
⁸⁷ 2006 IPCC Guidelines, Vol. 1, Chapter 3: Uncertainties [99], str. 3.8.

2010.) u Italiji je postojala precizna evidencija pa su se nesigurnosti svele na tek nekoliko vozila za koja se nije moglo utvrditi kojem emisijskom razredu (Euro n) pripadaju, te jedan manji broj teških teretnih vozila za koja nisu postojali podaci o razvrstavanju prema masi. U Poljskoj su nesigurnosti potjecale još i od nepoznate starosti vozila, pa je starost bila modelirana Weibullovom razdiobom unutar starosnih granica.

Nesigurnosti emisijskih faktora autori studije smatraju glavnom sastavnicom nesigurnosti svih modela za procjene emisija transporta. Ova nesigurnost potječe od varijabilnosti rezultata mjerenja koji čine podlogu za izradu emisijskih faktora (slika 4.44). Uzrok ove varijabilnosti je raznolikost vozila obuhvaćenih uzorkom na kome je obavljen eksperiment.

Nesigurnosti prevoženoga puta su također bile analizirane prikupljanjem podataka iz različitih izvora, a obuhvaćeno je bilo osam država. Prevoženi put je okarakteriziran kao „meki“ parametar koji je prema navodima studije „jedna od prvih veličina koje treba podešavati da bi se proračunska potrošnja goriva izjednačila sa statističkom“. Prevoženi put je također modeliran Weibullovom razdiobom. (**Komentar:** Ovdje se očito radi o nepostojanju bilo kakvih stvarnih podataka o godišnjem prevoženom putu i tu je Hrvatska u velikoj prednosti u odnosu na osam država analiziranih u navedenoj studiji.)

Nesigurnosti ostalih parametara i varijabla (brzina vožnje, udjela različitih prometnih situacija, meteoroloških uvjeta itd.) bile su analizirane na temelju podataka, ako su postojali, ili su bile procijenjene ako nije bilo drugih informacija.



Slika 4.44. Primjer varijabilnosti rezultata mjerenja emisijskih faktora.

Izvor: Kouridis et al. (2010) [100]

Rezultati analize su pokazali sljedeće:

- *Najnesigurnije* su procjene emisija CH_4 , N_2O i CO , ali se one mogu značajno poboljšati primjenom funkcije prevoženog puta. (**Komentar:** I ovdje je Hrvatska u velikoj prednosti, jer ima točne podatke o prevoženom putu.)

- *Najsigurnije* su bile procjene CO₂, jer on izravno ovisi o utrošenom gorivu. Slijedile su procjene NO_x i PM2.5 kod kojih je koeficijent varijacije⁸⁸ iznosio manje od 15 %.
- *Korekcija potrošnje goriva* unutar plus/minus jedne standardne devijacije službenih vrijednosti pokazala se posebno kritičnom, jer značajno smanjuje nesigurnost izračuna/procjene svih onečišćivača. Slijedom toga, dobri statistički podaci o utrošenim gorivima i usporedba s potrošnjom izračunatom u emisijskom modelu nužan su preduvjet za poboljšanje kvalitete inventara emisija. (**Komentar:** U Hrvatskoj je situacija upravo obrnuta. Postoje vrlo točni podaci o prevoženom putu, o broju vozila i njihovim emisijskim razredima te o prevoženom putu, a vrlo slabi podaci o gorivu prodanom sektoru cestovnog transporta. Zbog toga su daleko najbliže istinitima vrijednosti emisija izračunate emisijskim modelom na temelju navedenih podataka⁸⁹, kao što je učinjeno u ovome radu.)
- Relativno veća nesigurnost kod CH₄ i N₂O praktički nema utjecaja na nesigurnost ukupnih emisija stakleničkih plinova (CO_{2e}) jer u njima dominira CO₂. Zbog toga poboljšanje emisijskih faktora za CH₄ i N₂O neće povećati točnost ukupnih emisija stakleničkih plinova, osim ako se u budućnosti emisije CO₂ značajnije smanje.

U nizozemskoj studiji iz 2017. godine [101] kao dva glavna izvora nesigurnosti navedene su⁹⁰ nesigurnosti u procjeni aktivnosti vozila i nesigurnosti emisijskih faktora.

Podaci o aktivnostima očitavaju se iz stanja putomjera putničkih automobila i motocikala koji se bilježe od 1991. godine kao dio projekta NAP (Nationale Autopass)⁹¹, a od 2001. u njega su uključeni i kamioni, tegljači i autobusi. Udio puta nizozemskih vozila prevožen izvan države procijenjen je na temelju statističkih podataka na 4 %, a na isti iznos procijenjen je prevoženi put stranih vozila u Nizozemskoj. Nesigurnost raste s dodatnim podjelama godišnjeg prevoženog puta prema starosti vozila. Podjela prema tipu prometnice (naseljena mjesta, seoske ceste, autoceste) također povećava nesigurnost. Premda se kilometraža na autocestama precizno bilježi, procjena kilometraže na seoskim cestama je znatno manje točna, dok onu u naseljenim mjestima zapravo čini ostatak. Potrošnja goriva po tipovima prometnica računa se pomoću proračunskog modela, na temelju prosječne potrošnje i utjecajnih čimbenika, pa je taj podatak nesigurniji od same prosječne potrošnje. Prodaja goriva sektoru cestovnog transporta određena je na temelju istraživanja kompanija koje prodaju gorivo i smatra se relativno točnom.

Netočnosti vezane uz emisijske faktore podijeljene su na one koje se odnose 1. na gorivo,

⁸⁸ Koeficijent *CV* varijacije uzorka: $CV = (S / \bar{x}) \cdot 100\%$, gdje je: *S* – standardna devijacija uzorka, $\bar{x}$ – srednja vrijednost uzorka. . Izvori: Šošić [70], str. 100; *Statistics How To, How to Find a Coefficient of Variation*, <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/probability-and-statistics/how-to-find-a-coefficient-of-variation/>.

⁸⁹ Ovdje ipak ostaje kao glavni izvor nesigurnosti vrijednost emisijskih faktora. Međutim, s obzirom na to da se u ovome radu za procjenu emisija cestovnoga prometa primjenjuje model COPERT 5, kao i u najvećem broju država EU, njegovi emisijski faktori su u ovome slučaju mjerodavni, odnosno nisu predmetom rasprave.

⁹⁰ Str. 35-37.

⁹¹ Podaci su javno dostupni na komercijalnom internetskom servisu CARFAX: [https://www.carfax.nl/nap-check?gclid=EALaIqobChMIjMp77PW3QIVB5zVCh1LgwkVAAAYASAAEgLf4fD_BwE](https://www.carfax.nl/nap-check?gclid=EALaIqobChMIjMp77PW3QIVB5zVCh1LgwkVAAAYASAAEgLf4fD_BwE;); (CARFAX je osnovan 1984. g. u SAD-u, a danas je dostupan u EU (<https://www.carfax.eu/vehicle-history-report-packages>), Sloveniji, Španjolskoj i Švedskoj.)

2. na regulirano izgaranje, 3. na neregulirano izgaranje, 4. na isparavanja i 5. na istrošenje dijelova vozila (npr. pneumatika).

4.3.3. Zaključak

Nesigurnosti u procjeni emisija cestovnog transporta imaju dva glavna izvora. Prvi čine aktivnosti vozila, a drugi emisijski faktori. Nijedan od analiziranih radova ne bavi se procjenom nesigurnosti inventara emisija cestovnog transporta u cjelini, nego se procjenjuju nesigurnosti njegovih pojedinih sastavnica. Dobro su dokumentirane nesigurnosti, odnosno odstupanja emisijskih faktora od laboratorijskih mjerenja ili od vožnje u stvarnom svijetu. Također je detaljno analiziran broj vozila i njihovo razvrstavanje u emisijske razrede. Spominje se i razvrstavanje aktivnosti vozila po tipovima prometnica, ali konkretnih podataka o tome gotovo da i nema. Sastavni dio modela Tier 3 je ravnoteža utrošenoga goriva izračunatog na temelju aktivnosti vozila i emisijskih faktora s jedne strane, te prodanoga goriva s druge. U Smjernicama IPCC-a [61] se navode izvanredno zahtjevne preporuke *dobre prakse* koje treba zadovoljiti kod prikupljanja statističkih podataka o prodanom gorivu, ali o tome u spomenutim radovima opet nema ničega osim tek pokoje opaske. Stoga ne čudi što i sedam godina nakon meta analize pedeset studija Smita i suradnika⁹² [25], u spomenutoj nizozemskoj studiji iz 2017. [101], na samom početku potpoglavlja o nesigurnosti⁹³ stoji: „Kvantitativne procjene nesigurnosti ukupnih emisija cestovnog transporta ne postoje.“

Za poboljšanje nesigurnosti procjena emisija cestovnog transporta nužno je znatno unaprijediti prikupljanje podataka o količinama goriva prodanog ovome sektoru. U tom bi se slučaju procjene emisija stakleničkih plinova znatno poboljšale, jer u njima dominira CO₂ koji se izračunava izravno iz ugljika vezanog u gorivu. Dok se to ne dogodi, ocjenjivati se može samo primijenjena metodologija, dok će stvarne emisije stakleničkih plinova vrlo vjerojatno premašivati faktor pogreške 1,3 kojega navode Smit et al. [25].

⁹² Rezultati ovog rada detaljnije su opisani u 2. poglavlju.

⁹³ Str. 37: „Quantitative estimates of uncertainties in total emissions for road transport are not available.“

4.4. Dodatak: statističke oznake i simboli

Oznake i simboli nisu poredani abecedno nego su grupirani najprije prema Lindenu [68], a zatim po sličnosti.

Prihvaćena oznaka	Šošić [70]	Vogel [77]	Linden [69]	RealSt [72]	Excel 2010 + RealSt [72]	Naziv (u zagradama: engleski ili napomena)
DESKRIPTIVNA STATISTIKA						
α	α					razina signifikantnosti tj. odabrana maksimalna vjerojatnost pogreške
$\alpha, 1 - \alpha$						područje odbacivanja hipoteze, područje prihvatanja hipoteze
σ^2		σ^2		σ^2	VAR.P(R)	varijanca populacije (<i>engl. population variance</i>)
s^2				s^2	VAR.S(R)	varijanca uzorka (<i>engl. sample variance</i>)
σ				σ	STDEV.P(R)	standardna devijacija populacije (<i>engl. population standard deviation</i>)
s				s	STDEV.S(R)	standardna devijacija varijanca uzorka (<i>engl. sample standard deviation</i>)
CV	V					koeficijent varijacije uzorka
SS				SS	DEVSQ(R)	kvadratno odstupanje (<i>engl. squared deviation</i>)
				AAD	AVEDEV(R)	prosječno apsolutno odstupanje (<i>engl. Average Absolute Deviation</i>)
MAD	MAD			MAD (MAE)	MAD(R)	prosječno apsolutno odstupanje (<i>engl. Median Absolute Deviation</i>)
				V	STDEV.S(R)/AVERAGE(R)	koeficijent varijacije (<i>engl. Coefficient of Variation</i>)
$MASE$				$MASE$		srednja apsolutna skalirana pogreška (<i>engl. Mean Absolute Scaled Error</i>)
$SMAPE$				$SMAPE$		simetrična srednja apsolutna postotna pogreška (<i>engl. Symetric Mean Absolute Percentage Error</i>)
PROGNOSTIČKI MODELI						
				$AR(p)$		autoregresijski model reda p
				$MA(q)$		model pomičnih prosjeka reda q
				$ARMA(p, q)$		mješoviti model reda (p, q)
				$ARIMA(p, d, q)$		integrirani model reda (p, d, q)
				p		broj parametara autoregresijskog modela (broj lagova podataka uključenih u model ⁹⁴)
				d		red diferenciranja potreban da se postigne stacionarnost vremenskog niza
				q		širina prozora pomičnih prosjeka

⁹⁴ <https://machinelearningmastery.com/arima-for-time-series-forecasting-with-python/>
(How to Create an ARIMA Model for Time Series Forecasting in Python_(ARIMA(5,1,0)).pdf)

Prihvaćena oznaka	Šošić [70]	Vogel [77]	Linden [69]	RealSt [72]	Excel 2010 + RealSt [72]	Naziv (u zagradama: engleski ili napomena)
ACF	$\hat{\rho}(\tau), SACF$	$\hat{\rho}(\tau), ACF$		ACF		autokorelacijska funkcija (<i>engl. AutoCorrelation Function</i>) (<i>Šošić: SACF - engl. Sample AutoCorrelation Function</i>)
	T		b_t			trend komponenta vremenskog niza
$\hat{y}(x), \hat{y}_i$			L_t			prognozirana vrijednost u intervalu izmjerenih vrijednosti
i			m			broj budućih perioda u izradi prognoze
i	t	t	t	i		indeks diskretne varijable (npr. kalendarske godine) u intervalu izmjerenih vrijednosti (<i>Linden</i> , indeksi: u intervalu t , izvan intervala m)
i			m	i		indeks prognozirane diskretne varijable (npr. kalendarske godine) izvan intervala izmjerenih vrijednosti (<i>Linden</i> , indeksi: u intervalu t , izvan intervala m)
k	τ	τ		k		red (ili lag) koeficijenta autokorelacije ili parcijalne autokorelacije
n		n	t	n		broj perioda izmjerenih vrijednosti (<i>Linden</i>); duljina vremenskoga niza
	S	s_t	S_t			sezonska komponenta izmjerenih vrijednosti (<i>Linden</i> : koleba oko vrijednosti 1)
lag	lag	Lag		lag		zaostajanje točke na vremenskoj osi X^{95} , vremenska razlika; redni broj koeficijenta autokorelacije (također parcijalne)
L		L		L		funkcija vjerojatnosti (<i>engl. Likelihood Function</i>)
LL		l		LL		logaritamska funkcija vjerojatnosti (<i>engl. Log-Likelihood Function</i>)
			DES			dvostruko eksponencijalno zaglađivanje (<i>engl. Double Exponential Smoothing</i>)
$\hat{y}(x), \hat{y}_i$			F_{t+m}			prognozirana vrijednost za period $t + m$ kod jednostavnog eksponencijalnog zaglađivanja <i>SES</i>
MAE			MAE			srednja apsolutna postotna pogreška (<i>engl. Mean Absolute Percentage Error</i>); oznaka se upotrebljava: http://www.real-statistics.com/

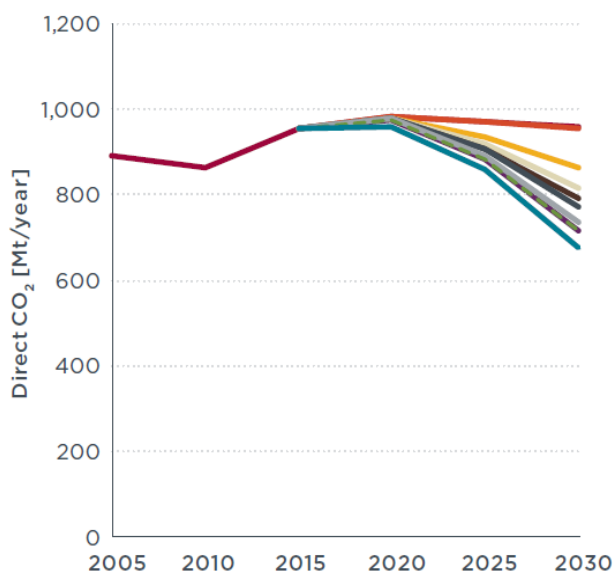
⁹⁵ Npr. ako se u vremenskom nizu vrijeme mjeri u točki T, tada sljedeća točka zaostaje za točkom T za jedan lag (<http://www.talkstats.com/threads/what-is-lag-time-series-question.27440/>). Opširnija objašnjenja dana su na forumu: <https://math.stackexchange.com/questions/2548314/what-is-lag-in-a-time-series> i u [77], str. 31.

Prihvaćena oznaka	Šošić [70]	Vogel [77]	Linden [69]	RealSt [72]	Excel 2010 + RealSt [72]	Naziv (u zagradama: engleski ili napomena)
$MAPE$			$MAPE$	$MAPE$		srednja apsolutna postotna pogreška (<i>engl. Mean Absolute Percentage Error</i>)
MPE			MPE			srednja postotna pogreška (<i>engl. Mean Percentage Error</i>)
MSE			MSE			srednja kvadratna pogreška (<i>engl. Mean Squared Error</i>)
$RMSE$			$RMSE$			korijen srednje kvadratne pogreške (<i>engl. Root Mean Squared Error</i>)
$PACF$	$SPACF$					funkcija parcijalne autokorelacije (<i>engl. Partial AutoCorrelation Function</i>)
R	r			r		koeficijent korelacije (Šošić: koeficijent linearne korelacije)
R_k	$\hat{\rho}(\tau)$					koeficijent autokorelacije reda k (Šošić: reda τ)
R^2	r^2			r^2	R^2	koeficijent determinacije
			SES			jednostavno eksponencijalno zaglađivanje (<i>engl. Simple Exponential Smoothing</i>)
SS				SS		zbroj kvadrata razlika izmjerenih vrijednosti i njihove aritmetičke sredine (<i>engl. Sum of Squares</i>)
SSE				SSE		zbroj kvadrata razlika točaka modela i izmjerenih točaka ili zbroj kvadrata pogrešaka (<i>engl. Sum of Squares of Errors</i>)
$SSTotal$						ukupan zbroj kvadrata razlika izmjerenih vrijednosti (točaka) i njihove aritmetičke sredine (<i>engl. Total Sum of Squares</i>)
$SSResidual$						ukupan rezidualni zbroj kvadrata razlika točaka modela i stvarnih točaka ili ukupan zbroj kvadrata pogrešaka SSE
$SSExplained$						$SSExplained = SSRegression$ - ukupan zbroj kvadrata razlika točaka modela i stvarnih točaka objašnjen (regresijskim) modelom
x				x		nezavisna varijabla (npr. kalendarska godina)
y_i			Y_t	y_i		izmjerena vrijednost (npr. broj registriranih vozila) u godini i
$\bar{y}$				$\bar{y}$		aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti
$\hat{y}(x)$				$\hat{y}(x)$		jednadžba regresijske funkcije kojom se opisuju izmjerene vrijednosti (u Excelu:krivulja trenda)
$\hat{y}_i$				$\hat{y}_i$		točka modela, tj. točka na krivulji regresijske funkcije (npr. broja vozila u godini i)

Prihvaćena oznaka	Šošić [70]	Vogel [77]	Linden [69]	RealSt [72]	Excel 2010 + RealSt [72]	Naziv (u zagradama: engleski ili napomena)
			α			$(0 \leq \alpha \leq 1)$ - u modelima <i>SES</i> : faktor zaglađivanja (korekcije) prognozirane vrijednosti F_t - u modelima <i>DES</i> : faktor zaglađivanja (korekcije) prethodno prognozirane vrijednosti L_{t-1} i trenda b_{t-1} - u modelima Holt-Winters: faktor zaglađivanja (korekcije) slučajnosti (random komponente) izmjerenih vrijednosti
			β			$(0 \leq \beta \leq 1)$ - u modelima <i>DES</i> : faktor zaglađivanja (korekcije) trenda b_{t-1} - u modelima Holt-Winters: faktor zaglađivanja (korekcije) trenda izmjerenih vrijednosti
			γ			$(\gamma \text{ koleba oko vrijednosti } 1)$ - u modelima Holt-Winters: faktor zaglađivanja sezonalnosti izmjerenih vrijednosti

5. SCENARIJSKA ANALIZA

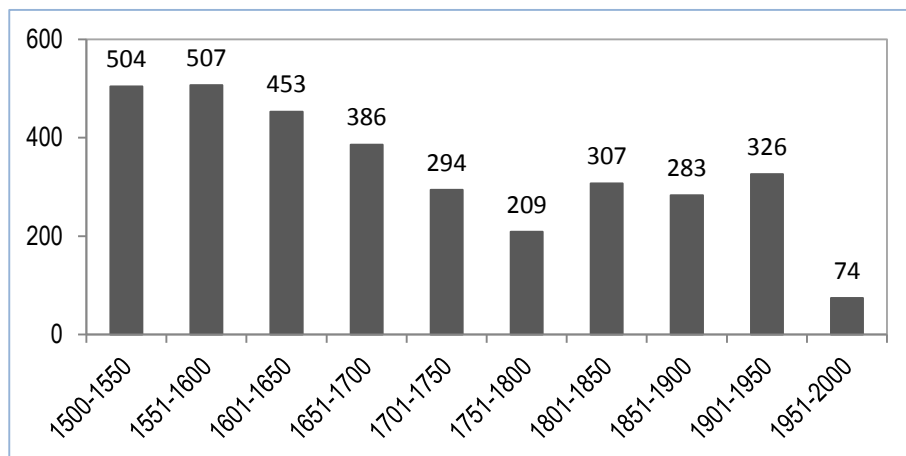
Sukladno usvojenim ciljevima EU, u sektoru cestovnog transporta do **2030.** godine emisije stakleničkih plinova moraju se smanjiti u odnosu na **2005.** godinu za 30 % [14]. Postavlja se uistinu opravdano pitanje može li Republika Hrvatska i pod kojim uvjetima ispuniti ove ciljeve. U tom je svjetlu razmotreno nekoliko scenarija u kojima je pokazano s kakvim će se izazovima suočiti Hrvatska na tom putu. Razmatranja su provedena na floti vozila M1, a rezultati su potom preslikani na cijelu flotu cestovnih motornih vozila. Udio vozila kategorije M1 u ukupnoj floti cestovnih vozila u promatranom je razdoblju od 2007. do 2016. godine izrazito stabilan, s blagom tendencijom opadanja od 76 % na 75 %. Ovako kratko proteklo vremensko razdoblje predstavlja vrlo kratak vremenski niz tako da prognoze na temelju ovako malog broja podataka ne mogu biti pouzdane, već su samo informativnog karaktera. S protekom vremena i približavanjem ciljnoj 2030. godini bit će potrebno provoditi korekcije po isteku svake godine. Međutim, situacija nije nimalo bolja ni u tijelima Europske unije koja prate postizanje ovoga cilja [14], [102], slika 5.1..



Slika 5.1. Prognoza emisija ICCT-a za 2020., 2025. i 2030. godinu na temelju podataka za 2005., 2010. i 2015.⁹⁶

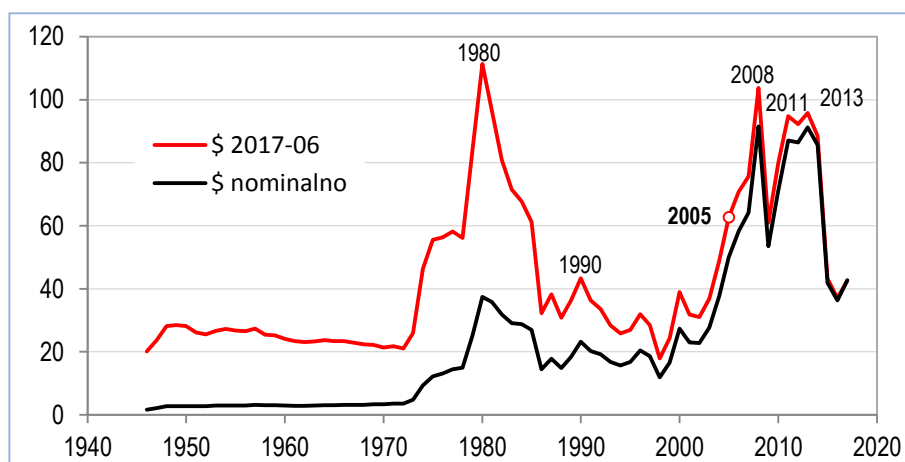
⁹⁶ Emisije CO₂ teretnih vozila u EU. Prognoza pokazuje moguće ishode raznih tehničkih poboljšanja i mjera fiskalne politike. Izvor: Miller (2016) [102].

Na točnost prognoza utječe niz vanjskih čimbenika koje je nemoguće predvidjeti, a Europa je posebno turbulentno područje. Primjerice prema podacima na stranici analitičara Maxa Mosera⁹⁷, broj godina u kojima su europske države međusobno ratovale je zastrašujuće velik (slika 5.2.). Upravo zbog toga se Europska unija smatra najboljim jamcem mira u Europi.



Slika 5.2. Za svaki period od 50 godina dijagram pokazuje zbroj godina u ratu za sve europske države (vlastiti prikaz prema [103])

Najutjecajniji faktor emisija cestovnog transporta su cijene nafte na svjetskom tržištu, a motor njihova povećanja su krize i ratna žarišta u svijetu.



Slika 5.3. Kretanje cijena barela sirove nafte od 1946. do 2017. godine: 1980. – početak rata između Irana i Iraka; 1990. – Irak napao Kuvait, Zaljevski rat; 2005. – referentna godina za smanjivanje emisija; 2008. – rat u Gazi; Arapsko proljeće, rušenje Gadafija; 2013.-2014. – nastavak rata u Libiji⁹⁸

Ove i slične okolnosti su izvan dohvata ovog rada pa će stoga biti iznimno važno redovito praćenje na godišnjoj razini emisija cestovnog transporta u Republici Hrvatskoj.

⁹⁷ Max Moser je ekonomist na University of Oxford, osnivač i direktor projekta Our World in Data. Podaci na slici 5.2. objavljeni su pod naslovom *Years in which European countries took part in an international war, 1500-2000*. [103]

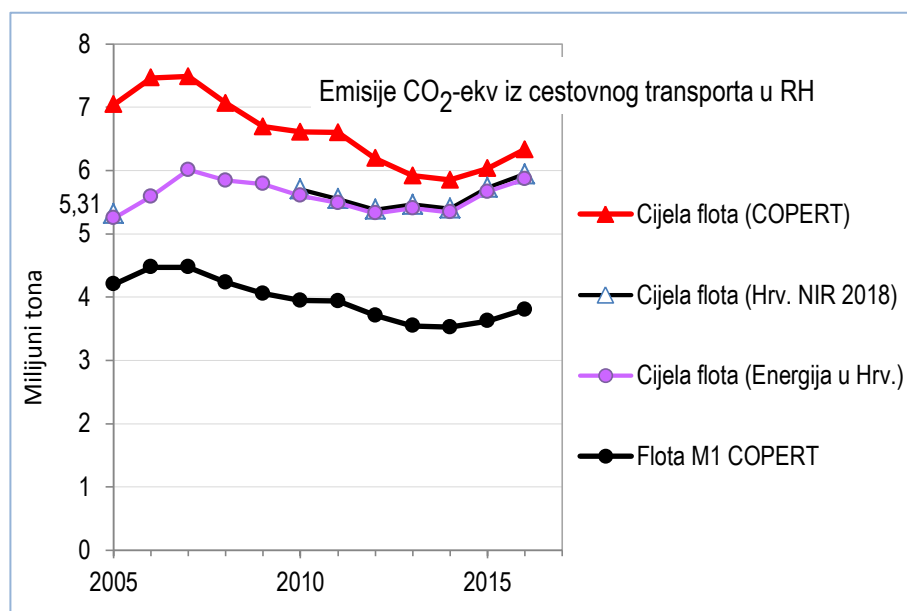
⁹⁸ Izvor cijena: Historical Crude Oil Prices (Table) [104]

5.1. Emisije iz cestovnog transporta u Hrvatskoj 2005. godine

Službeni podaci. Emisije stakleničkih plinova iz cestovnog transporta u Republici Hrvatskoj objavljuju se u dvije serije dokumenata. Prva je *Energija u Hrvatskoj, Godišnji energetski pregled* u izdanju ministarstva u čiji resor ta tema u datom trenutku spada. Druga serija je godišnje *Izvešće o inventaru stakleničkih plinova na području Republike Hrvatske* (skraćeno NIR) u izdanju Hrvatske agencije za okoliš i prirodu. Niti jedan dokument ne sadrži podatke o emisijama stakleničkih plinova za cijelo razdoblje od 2005. do 2017., odnosno do posljednje tekuće godine. Stoga su podaci na temelju kojih su nacrtane srednje dvije krivulje na dijagramu 5.4. rezultat četiri različita dokumenta: [105], [63], [106] i [64]. Emisije su neznatno više u NIR-u te su u izvješću za 2018. godinu [105] za referentnu 2005. godinu prijavljene u iznosu od⁹⁹:

$$E_{2005} = 5.314.100 \text{ t CO}_2\text{-ekv.} \quad (5.1)$$

Prema navodima u NIR-u 2018. [105] emisije CO₂ su procijenjene metodom Tier 1, a emisije CH₄ i N₂O¹⁰⁰ programom COPERT 4 (Tier2/3).



Slika 5.4. Emisije iz cestovnog transporta u Hrvatskoj prema službenim izvorima¹⁰¹ (srednje dvije krivulje) i procjenama ovoga rada (gornja i donja krivulja)

⁹⁹ Ti podaci, koji su mjerodavni za Republiku Hrvatsku, nažalost su neznatno smanjeni u odnosu na izvješće iz 2009. [107]. Podaci za cijelo promatrano razdoblje od 2005. do 2017. godine ne postoje u objavljenim NIR-ovima. NIR za 2009. godinu [107] sadrži podatke za 2005., 2006. i 2007. godinu, ali oni nisu usklađeni s podacima u NIR-u 2018. pa nisu uzeti u obzir. U podacima NIR-a ne vidi se karakterističan lokalni maksimum emisija u 2006./2007. godini, prisutan u EU-28 (vidi: (1) 4.1.2.1.2. Rekonstrukcija 2005. godine, (2) EEA greenhouse gas - data viewer [108]). Zbog toga je u dijagramu nacrtana i krivulja na temelju podataka u izvješću o Energija u Hrvatskoj [63], [106] i [64].

¹⁰⁰ Od ispušnih plinova motora u stakleničke se ubrajaju samo ova tri, prema kriterijima IPCC-a [2]. Za razdoblje od 2005. do 2016. u EU-28, za vozila kategorije M1, postoje čvrsti omjeri (izraženi u masi CO₂-ekv.) među emisijama ovih plinova: CO₂ : CH₄ : N₂O = 100 : 0,93 : 0,20.

Primjenom programa COPERT 5, razine Tier 3, emisije u 2005. godini u ovom su radu procijenjene ovako:

- Emisije CO₂ hrvatske flote M1 izračunate u ovom radu programom COPERT 5 iznose:

$$E_{2005}^*(M1) = 4.202.630 \text{ t CO}_2 \quad (5.2)$$

- U EU-28 postoji postojan omjer između emisija CO₂ flote M1 i sume emisija svih stakleničkih plinova (GHG) cjelokupne flote cestovnih vozila koji u razdoblju od 2005. do 2016. godine iznosi čvrstih¹⁰² 60 %. Pod pretpostavkom da se taj omjer zadrži i u Hrvatskoj, ukupne emisije stakleničkih plinova iz cestovnog transporta u 2005. godini iznose:

$$\begin{aligned} E_{2005}^* &= \frac{E_{2005}^*(M1)}{0,60} = \\ &= 4.202.630 / 0,60 \approx 7.004.000 \text{ t CO}_2\text{-ekv} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Ovaj je iznos za čak 32 % veći od onog u NIR-u izračunatog metodom Tier 1. Modeli Tier 1, 2 i 3 su načelno formirani tako da kod grubih procjena (Tier 1) rezultati emisija uvijek budu veći, a profinjavanjem modela (prema Tier 2 i konačno modelom Tier 3) se dobiva sve točniji uvid u emisije i iznosi emisija su sve niži [62]. U Smjernicama za nacionalne inventare emisija stakleničkih plinova, Međuvladinog panela za promjenu klime [61], se doduše preporučuje da se emisije CO₂ u cestovnom transportu računaju modelom Tier 1 ili Tier 2, na temelju količina goriva prodanih u sektoru cestovnog transporta. Nasuprot tome, za emisije CH₄ i N₂O se preporučuje model Tier 3 koji uzima u obzir prevoženi put i tehnološku razinu uređaja za pročišćavanje ispušnih plinova (Euro 1, Euro 2, ...) o kojima te emisije ovise. Međutim, u izračunu emisija CO₂ u Europi se već niz godina primjenjuju modeli Tier 3 [34]. Nadalje, u već spomenutom priručniku EMEP/EEA [62], preporučuje se da „zemlja mora uložiti sve napore kako bi prikupila detaljne statistike potrebne za korištenje viših metoda Tier, po mogućnosti Tier 3“. Dakle, postoje jaki razlozi da se s punim pravom ustvrdi kako su emisije stakleničkih plinova iz cestovnog transporta u Republici Hrvatskoj, u 2005. godini, u službenim dokumentima iskazane barem 32 % prenisko. U scenarijskoj analizi će se pokazati da će **ta pogreška za Hrvatsku biti sudbonosnom preprekom** u zadovoljavanju obvezujućih ciljeva EU u pogledu smanjivanja emisija za 30 % do 2030. godine.

¹⁰¹ Srednje dvije krivulje: (Hrv. NIR 2018) - Izvješće o inventaru stakleničkih plinova na području Republike Hrvatske za razdoblje 1990.-2016. (NIR 2018) [105].

¹⁰² Na stranici EEA greenhouse gas - data viewer [108] objavljeni su detaljni podaci o emisijama iz cestovnog prometa u EU-28. Za razdoblje od 2005. do 2016. omjer varira između 59,6 % i 60,5 % (prosjeak: 59,9 %), a od 1990. do 2016. prosječna vrijednost je 60,6 %. Vidi i potpoglavlje 4.2.

5.2. Granične emisije iz cestovnog transporta u 2030. godini

Sukladno obvezujućim ciljevima EU objavljenima u 'Klimatskom i energetsom okviru do 2030.' [6], do 2030. godine emisije stakleničkih plinova iz sektora izvan sustava trgovanja emisijama ETS-a (engl. *Emissions Trading System*)¹⁰³, a tu spada cestovni transport, treba smanjiti za 30 % u odnosu na emisije u 2005. godini, tj. ispod granične emisije od:

$$E_{2030} \leq 0,7 \cdot 5.314.100 = 3.719.870 \text{ t CO}_2\text{-ekv} \quad (5.4)$$

Prema ovom radu, granične emisije u 2030. godini trebale bi biti barem 32 % veće, odnosno:

$$E_{2030}^* = 0,7 \cdot 7.004.000 \approx 4.900.000 \text{ t CO}_2\text{-ekv} \quad (5.5)$$

5.3. Prognostički parametri hrvatske flote M1

Scenarijska analiza počiva na podacima flote M1 za razdoblje od 2005. do 2017. godine te na prognozama izrađenim na temelju tih podataka. Za provedbu scenarijske analize potrebne su sljedeće prognoze:

- prognoza broja vozila flote
- prognoza brzine obnavljanja flote koja uključuje:
 - prognozu broja prvi put registriranih vozila
 - prognozu broja otpadnih, odnosno odjavljenih vozila
- prognoza prosječnog godišnjeg prevoženog puta vozila
- prognoza emisijskih faktora

Opisi ovih prognoza i rezultati pokazani su dijagramima u nastavku, a brožčani podaci sažeti su u tablici 5.1.¹⁰⁴

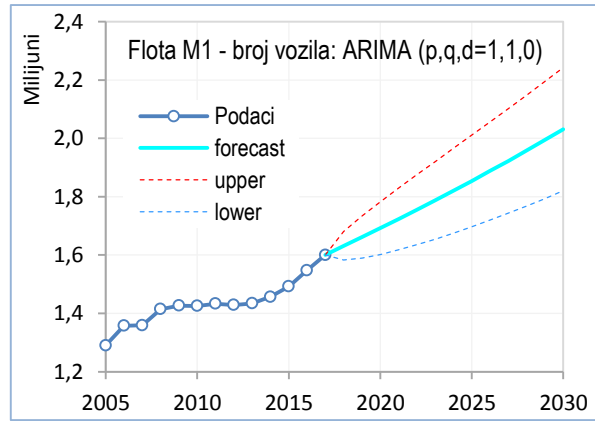
5.3.1. Broj vozila i brzina obnavljanja flote

Broj vozila flote M1 do 2030. godine prognozirani je metodom ARIMA. Na temelju te prognoze izračunat je godišnji prirast vozila¹⁰⁵ u prognostičkom razdoblju (slike 5.5. i 5.6.). Sam godišnji prirast je u prognostičkom razdoblju prilično skroman i u 2030. dostiže nepunih 37 tisuća vozila. Međutim, za procjenu intenziteta obnavljanja flote mjerodavan je broj prvi put registriranih vozila, a njegove su prognoze znatno veće, što je pokazano u nastavku.

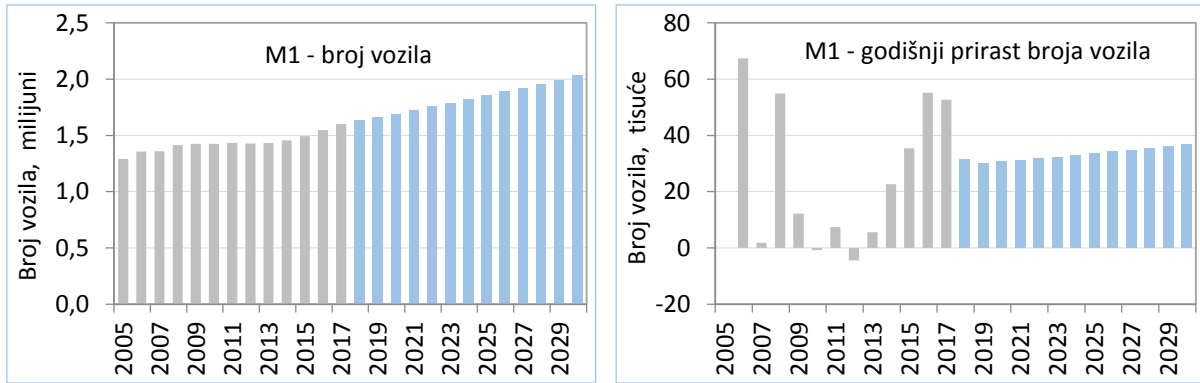
¹⁰³ ETS (engl. Emissions Trading System) – sustav trgovanja emisijama.

¹⁰⁴ Podaci o broju vozila, njihovoj emisijskoj strukturi, broju prvih registracija i prevoženom putu dobiveni su iz baze podataka Centra za vozila Hrvatske. Sve je pokazano u poglavlju 3. Emisijski faktori izračunati su programom opisanim u potpoglavlju 4.1.1. PODMODEL 1: Model za procjenu emisija COPERT 5.

¹⁰⁵ Godišnji prirast definiran je u ovom slučaju kao razlika između broja vozila u tekućoj godini i broja vozila u prethodnoj godini.



Slika 5.5. Prognoza broja vozila flote M1 do 2030.



Slika 5.6. Prognoza broja vozila (ARIMA (p,q,d=1,1,0)) i na osnovi nje izračunat godišnji prirast broja vozila (sivi stupci: povijesni podaci, plavi stupci: prognoza).

Broj vozila

Da bi se mogla prognozirati difuzija prvi put registriranih vozila s novim pogonskim sustavima, treba ustanoviti odnose između tih vozila, svih vozila flote i otpadnih vozila. Broj vozila N_j u promatranoj godini j jednak je zbroju vozila u prošloj godini N_{j-1} i prvi put registriranih ovogodišnjih vozila $N_j^{1.REG}$ umanjenom za broj otpadnih vozila N_j^{OTP} :

$$N_j = N_{j-1} + N_j^{1.REG} - N_j^{OTP} \quad (5.6)$$

Označi li se udio prvi put registriranih vozila u floti M1 s $x_j^{1.REG}$, a udio otpadnih vozila u floti M1 s x_j^{OTP} može se pisati:

$$N_j^{1.REG} = x_j^{1.REG} \cdot N_j, \quad N_j^{OTP} = x_j^{OTP} \cdot N_j \quad (5.7)$$

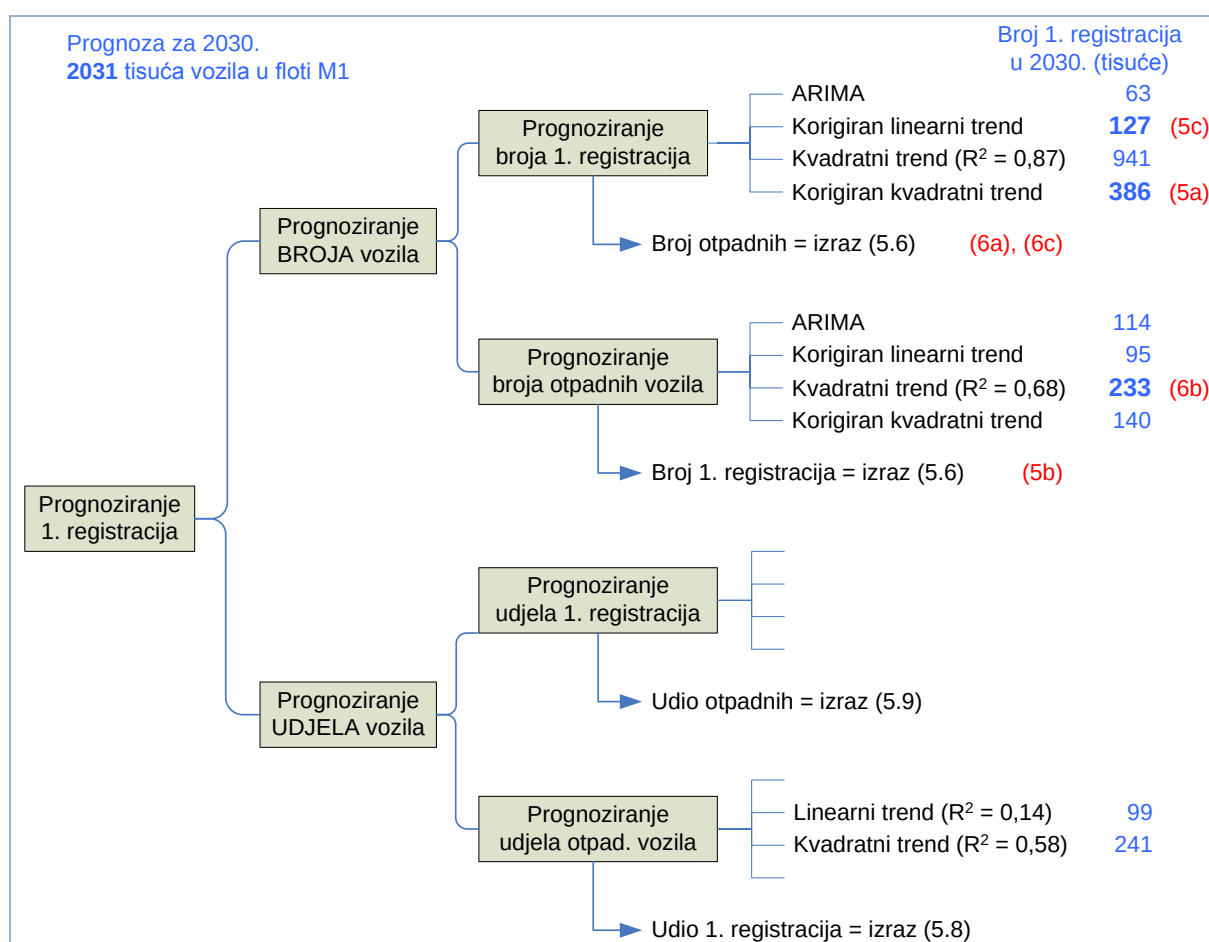
Uvrštenjem u (5.6) izračunavaju se sljedeći odnosi:

$$x_j^{1.REG} = 1 - \frac{N_{j-1} - N_j^{OTP}}{N_j} \quad (5.8)$$

$$x_j^{OTP} = \frac{N_{j-1} + N_j^{1.REG}}{N_j} - 1 \quad (5.9)$$

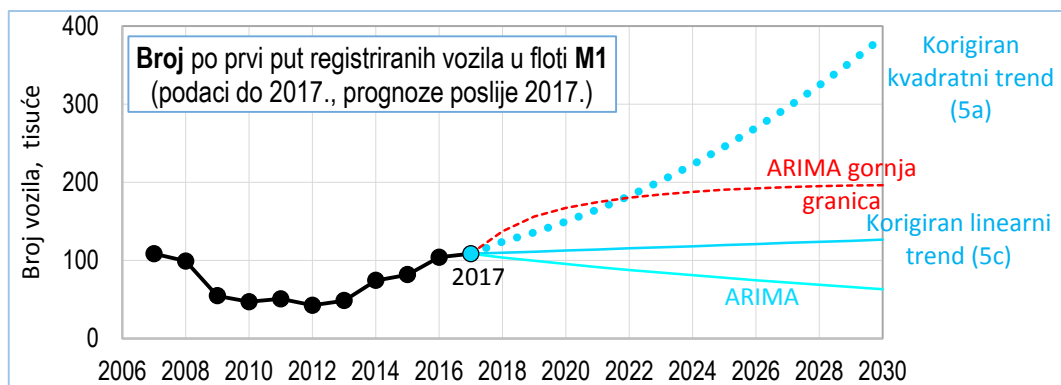
Dakle, da bi bila zadovoljena jednačba (5.6), regresijskom funkcijom se može prognozirati samo jedan od udjela: ili udio prvi put registriranih vozila ili udio otpadnih vozila. Ako su npr. poznati broj vozila u floti N_j i broj prvi put registriranih vozila $N_j^{1.REG}$, udio otpadnih vozila je definiran izrazom (5.9).

Prognoziranje broja prvi put registriranih vozila (novih + rabljenih) može se provesti na dva osnovna načina: prognoziranjem *broja* vozila ili prognoziranjem *udjela* vozila u floti. Svaki od ova dva načina grana se u nova dva smjera: *prognoziranje prvi put registriranih vozila* (a broj ili udio otpadnih vozila se izračunava) ili *prognoziranje otpadnih vozila* (a broj ili udio prvi put registriranih vozila se izračunava). Pregled navedenih načina pokazan je na slici 5.7. Ovisno o odabranom načinu prognoziranja, bitno se mijenja broj prvi put registriranih vozila u 2030. godini. Za scenarijsku analizu su odabrana tri rezultata (vidi **plave masne brojke** na slici 5.7., dijagrame na slici 5.9. i odgovarajuće stupce u tablici 5.1.): *brže obnavljanje* flote vozila M1 (stupci (5a) i (6a) u tablici 5.1.), *sporije obnavljanje* ((5b), (6b)) i *najsporije obnavljanje* flote ((5c), (6c)). Ove tri inačice pokazane su i dijagramima na slici 5.9. Scenariji u nastavku pokazuju da se obvezujuće smanjenje emisija do 2030. godine može dostići samo *bržim obnavljanjem* flote (gornji dijagram na slici 5.9.).

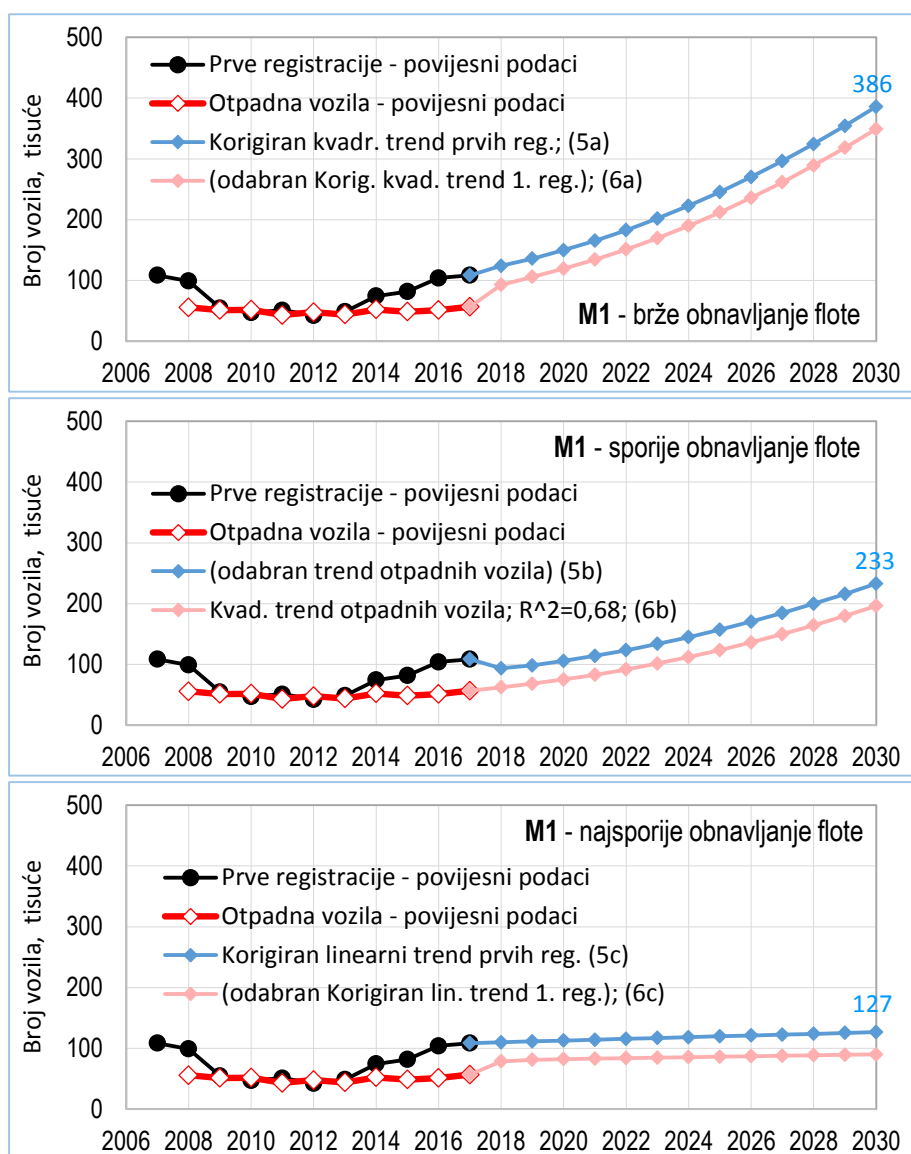


Slika 5.7. Mogući načini prognoziranja broja prvi put registriranih vozila¹⁰⁶
(crvene brojke su oznake stupaca u tablici 5.1.)

¹⁰⁶ Korigiran kvadratni trend“ jednak je 1/3 kvadratnog trenda, a „Korigiran linearni trend“ ima isti nagib kao i linearni trend, ali su obje „korigirane“ krivulje translahirane po visini tako da prolaze točkom 2017.



Slika 5.8. Primjer prognoza broja prvi put registriranih vozila izračunatih regresijskim funkcijama i metodom ARIMA¹⁰⁷



Slika 5.9. Tri scenarija obnavljanja flote. Brojevi (5a) do (6c) označavaju stupce u tablici 5.1.

¹⁰⁷ „Gornja granica“ intervala pouzdanosti iznosi 95 % vjerojatnosti, što znači da će se u 95 % svih slučajeva stvarna vrijednost nalaziti u intervalu pouzdanosti.

Tablica 5.1. Prognoštički parametri i rezultati prognoza svih vozila hrvatske flote M1¹⁰⁸

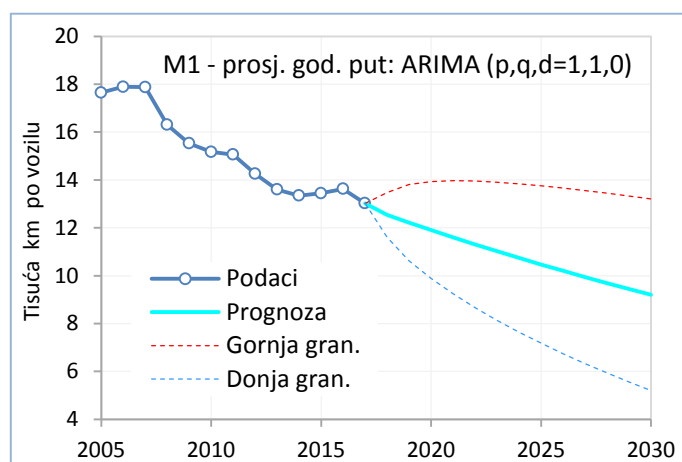
Godina	Broj vozila u floti	Prosjeck km/ vozilo	Ukup. 10 ⁹ km	Udio 1. reg. u M1	Udio otpad. vozila u M1	Udio 1. reg. u M1	Udio otpad. vozila u M1	Udio 1. reg. u M1	Udio otpad. vozila u M1	M1 - EF CO ₂ g/km								
										Flota		Flota bez hibrida	benzin	dizel		UNP	hibrid	
										(7)	(7a)	(8)	(9)	(10)	(10a)	(11)	(12)	(12a)
(1)	(2)	(3)	(4)= (2)× (3)	brže obnavljanje		sporije obnavljanje		najsporije obnavljanje										
				(5a)	(6a)	(5b)	(6b)	(5c)	(6c)									
2005	1.290.142	17.652	22,8							184,62	184,62	184,62	186,21	182,59	182,59	158,81	128,76	128,76
2006	1.357.580	17.891	24,3							184,23	184,23	184,23	186,05	182,13	182,13	158,88	128,63	128,63
2007	1.359.374	17.880	24,3	7,99%		7,99%		7,99%		183,95	183,95	183,96	186,00	181,57	181,57	158,92	127,75	127,75
2008	1.414.280	16.305	23,1	7,01%	3,93%	7,01%	3,93%	7,01%	3,93%	183,45	183,45	183,46	185,95	180,92	180,92	158,97	128,09	128,09
2009	1.426.452	15.530	22,2	3,82%	3,59%	3,82%	3,59%	3,82%	3,59%	182,97	182,97	182,97	185,49	180,88	180,88	159,06	129,21	129,21
2010	1.425.699	15.172	21,6	3,30%	3,62%	3,30%	3,62%	3,30%	3,62%	182,32	182,32	182,33	184,90	180,33	180,33	159,21	128,62	128,62
2011	1.433.064	15.060	21,6	3,54%	3,01%	3,54%	3,01%	3,54%	3,01%	182,39	182,39	182,40	185,26	180,03	180,03	159,23	128,24	128,24
2012	1.428.608	14.257	20,4	2,97%	3,33%	2,97%	3,33%	2,97%	3,33%	182,08	182,08	182,09	185,14	179,57	179,57	159,27	127,75	127,75
2013	1.434.207	13.601	19,5	3,38%	3,06%	3,38%	3,06%	3,38%	3,06%	181,67	181,67	181,69	184,79	179,28	179,28	159,30	127,42	127,42
2014	1.456.922	13.347	19,4	5,11%	3,58%	5,11%	3,58%	5,11%	3,58%	181,22	181,22	181,25	184,67	178,68	178,68	159,36	126,92	126,92
2015	1.492.342	13.444	20,1	5,48%	3,25%	5,48%	3,25%	5,48%	3,25%	180,49	180,49	180,53	184,56	177,52	177,52	159,43	127,61	127,61
2016	1.547.596	13.624	21,1	6,72%	3,30%	6,72%	3,30%	6,72%	3,30%	180,25	180,25	180,32	184,53	177,48	177,48	159,54	127,43	127,43
2017	1.600.363	13.025	20,8	6,78%	3,55%	6,78%	3,55%	6,78%	3,55%	179,61	179,83	179,96	184,21	177,12	176,65	159,58	127,18	126,70
2018	1.631.631	12.537	20,5	7,59%	5,68%	7,59%	5,68%	7,59%	5,68%	179,22	179,40	179,58	184,04	176,66	175,95	159,64	127,05	126,31
2019	1.661.690	12.218	20,3	8,18%	6,37%	8,18%	6,37%	8,18%	6,37%	178,82	178,96	179,19	183,88	176,21	175,19	159,71	126,91	125,87
2020	1.692.302	11.908	20,2	8,85%	7,04%	8,85%	7,04%	8,85%	7,04%	178,43	178,51	178,80	183,71	175,75	174,40	159,77	126,78	125,40
2021	1.723.478	11.605	20,0	9,59%	7,79%	9,59%	7,79%	9,59%	7,79%	178,03	178,05	178,41	183,54	175,29	173,57	159,84	126,65	124,87
2022	1.755.229	11.310	19,9	10,4%	8,60%	10,4%	8,60%	10,4%	8,60%	177,64	177,59	178,02	183,38	174,84	172,69	159,90	126,52	124,31
2023	1.787.564	11.022	19,7	11,3%	9,49%	11,3%	9,49%	11,3%	9,49%	177,24	177,12	177,63	183,21	174,38	171,77	159,96	126,39	123,70
2024	1.820.495	10.742	19,6	12,2%	10,4%	12,2%	10,4%	12,2%	10,4%	176,85	176,64	177,25	183,04	173,93	170,81	160,03	126,25	123,05
2025	1.854.033	10.469	19,4	13,2%	11,4%	13,2%	11,4%	13,2%	11,4%	176,46	176,15	176,86	182,88	173,47	169,80	160,09	126,12	122,35
2026	1.888.189	10.203	19,3	14,3%	12,5%	14,3%	12,5%	14,3%	12,5%	176,06	175,66	176,47	182,71	173,01	168,76	160,15	125,99	121,61
2027	1.922.974	9.943	19,1	15,4%	13,6%	15,4%	13,6%	15,4%	13,6%	175,67	175,17	176,08	182,54	172,56	167,67	160,22	125,86	120,83
2028	1.958.399	9.690	19,0	16,6%	14,8%	16,6%	14,8%	16,6%	14,8%	175,27	174,66	175,69	182,38	172,10	166,54	160,28	125,72	120,01
2029	1.994.478	9.444	18,8	17,8%	16,0%	17,8%	16,0%	17,8%	16,0%	174,88	174,15	175,31	182,21	171,65	165,36	160,35	125,59	119,14
2030	2.031.221	9.204	18,7	19,0%	17,2%	19,0%	17,2%	19,0%	17,2%	174,48	173,63	174,92	182,04	171,19	164,15	160,41	125,46	118,23
R ²				korig.			0,681	korig.		0,978	0,978	0,978	0,869	0,967	0,980	0,965	0,365	0,428
Regr.fun.	ARIMA	ARIMA		pol.2	izračun	izračun	pol.2	linear	izračun	pravac	polin.2	pravac	pravac	pravac	polin.2	pravac	pravac	polin.2

Broj vozila u floti, broj prvi put registriranih vozila i broj otpadnih vozila su tri međusobno spregnute veličine (vidi izraz (5.6)). Odabere li se trend promjene udjela po prvi puta registriranih vozila, on tada definira i udio otpadnih vozila. I obrnuto. Za tri odabrana trenda postoje tri para podataka za ove udjele: prvi par (5a), (6a), drugi par (5b), (6b) i treći par (5c), (6c). Razlike između linearnih i kvadratnih regresijskih funkcija emisijskog faktora M1 – EF CO₂ za Flotu M1, Diesel i hibrid nisu velike, dok za benzin i UNP kvadratne nisu upotrebljive, jer u 2030. godini poprimaju vrlo visoke vrijednosti.

¹⁰⁸ Plave brojke u 2005. i 2006. godini su emisijski faktori izračunati na temelju rekonstruiranog prevoženog puta (vidi: 4.1.2.1.2. Rekonstrukcija 2005. godine). Za 2017. godinu u trenutku izrade rada bili su poznati podaci o broju vozila i prevoženom putu, ali nije bilo dovoljno podataka za izračun emisijskih faktora. Plave brojke od 2017. godine i dalje predstavljaju prognozu, a na dnu tablice je napisan koeficijent determinacije R^2 (opisan u potpoglavlju 4.1.2.1. Regresijska analiza parametara flote) i naznačena je primijenjena regresijska metoda, odnosno metoda ARIMA (vidi potpoglavlja 4.1.2.2. do 4.1.2.7.).

5.3.2. Prosječan godišnji put vozila

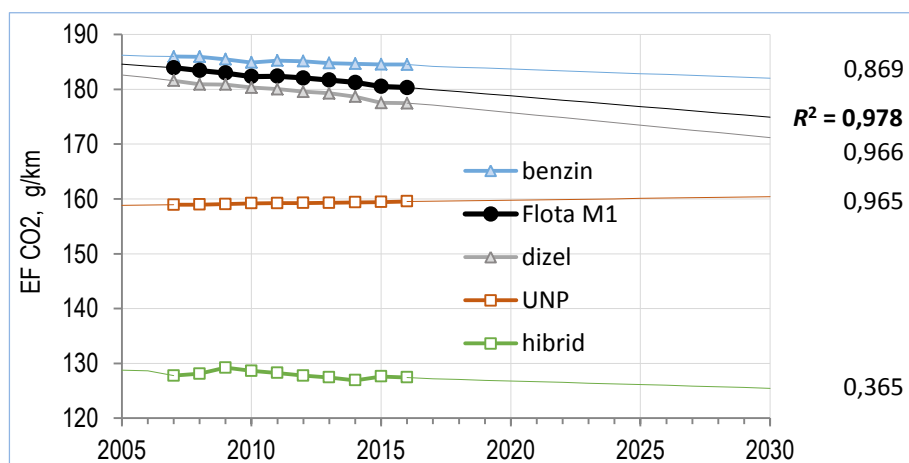
Prosječan godišnji put vozila M1 do 2030. godine prognozirano je također metodom ARIMA. Kao što pokazuje dijagram na slici 5.10., prosječan godišnji put gotovo linearno opada s 13 tisuća kilometara u 2017. godini, na tek nešto iznad 9 tisuća u 2030. Premda takva prognoza djeluje pomalo nerealno i pesimistički, primijenjena je iz dva razloga. Prvi je da iza nje stoji matematička podloga koja omogućuje sustavno popravljivanje prognoze nakon svake protekle godine. Dugi razlog jest taj što rezultati scenarijske analize u potpoglavlju 5.5. pokazuju da je i ovako skromno prognozirano put vozila prevelik za smanjenje emisija ispod ciljane vrijednosti do 2030. godine.



Slika 5.10. Prognoza prosječnog godišnjeg prevoženog puta flote M1 do 2030.

5.3.3. Emisijski faktori

Prognoza emisijskih faktora EF CO₂ pokazana je slikom 5.11. Niska vrijednost R^2 za hibride je posljedicom naglog i nejednolikog porasta relativno malog broja vozila (u 2007. samo 63 vozila, a u 2016. godini 1856 vozila).

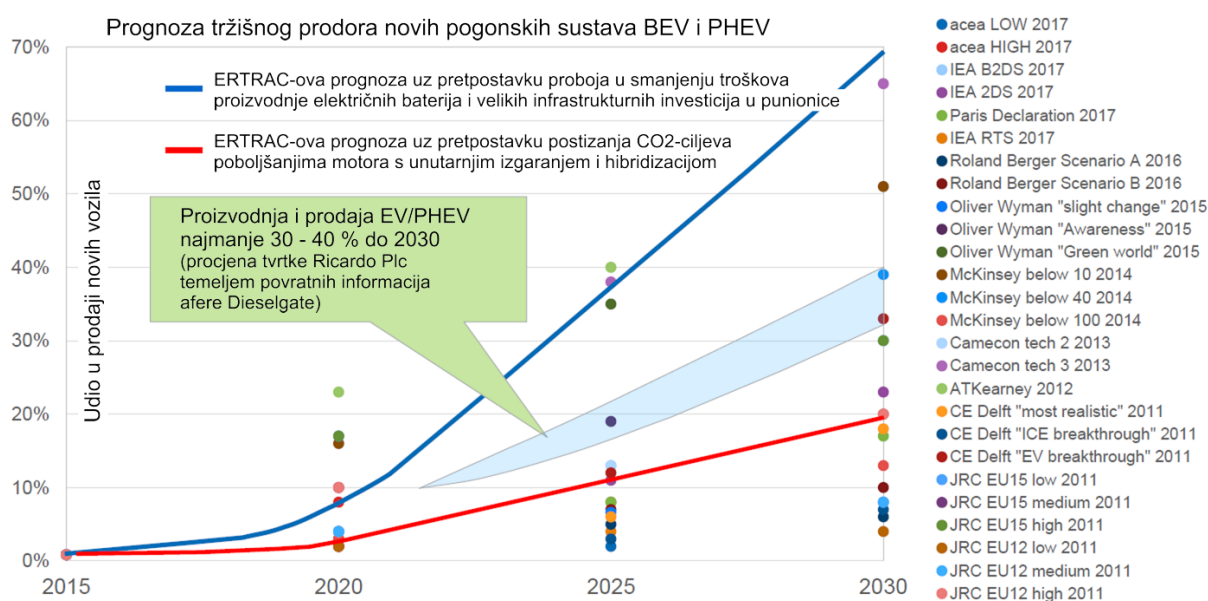


Slika 5.11. Emisijski faktori CO₂ hrvatske flote M1 po pojedinim vrstama goriva (od 2007. do 2016. podaci izračunati programom COPERT 5, ostalo linearna regresija)

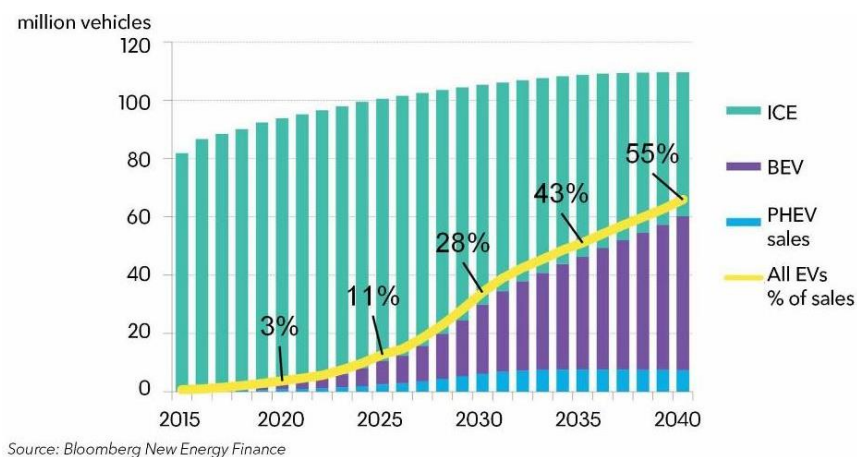
5.4. Prognoze difuzije novih tehnologija

Promotri li se dijagram emisijskih faktora na slici 5.11. vidi se da se veće smanjenje emisija u budućnosti može ostvariti samo značajnim povećanjem sada zanemarivo malog udjela hibridnih vozila u hrvatskoj floti, odnosno povećanjem udjela novih pogonskih sustava. Zbog toga je od presudne važnosti realno procijeniti moguće granice prodora ovih novih tehnologija na hrvatsko tržište.

Predviđanje difuzije novih tehnologija u sektor cestovnog transporta predmetom je procjena vodećih svjetskih institucija koje se bave ekonomskim istraživanjima i pružanjem konzultantskih i analitičkih usluga. U izvještaju britanskog instituta Ricardo, iz 2017. godine, pokazan je pregled 26 prognoza koje je prema različitim scenarijima izradilo 11 institucija (slika 5.12.). Velike međusobne razlike u rezultatima ukazuju na kompleksnost i neizvjesnosti kojima su opterećene ovakve prognoze.



Slika 5.12. Prognoze difuzije novih pogonskih sustava BEV i PHEV¹⁰⁹ [109]



Slika 5.13. Prognoza udjela vozila s novim pogonskim sustavima u prodaji novih vozila na svjetskoj razini [110]

Predviđena difuzija novih pogonskih sustava (HEV, PHEV, BEV¹⁰⁹) u budućnosti prema Bloombergovoj procjeni iz 2018. godine pokazana je na slici 5.13. Pod pretpostavkom da se i difuzija u Hrvatsku flotu bude događala približno istom brzinom, u 2030. godini ovih bi novih vozila bilo 28 % u cjelokupnoj floti. Prema evidenciji CVH, u 2017. godini takvih vozila je bilo ukupno 2.500, odnosno 0,16 %.

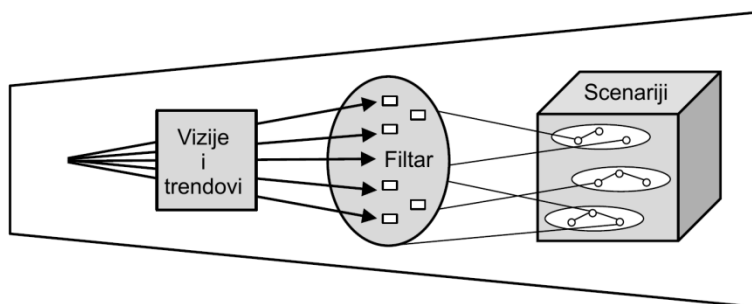
5.5. Scenarijska analiza emisija

Izračun emisija CO₂ flote M1. Emisije $ECO_{2,j}$ u godini j , ugljikovog dioksida, jednake su umnošku broja vozila N_j , prosječnog godišnjeg puta vozila s_j , km i emisijskog faktora $EFCO_{2,j}$, g/km:

$$ECO_{2,j} = N_j \cdot s_j \cdot EFCO_{2,j} \quad (5.10)$$

Emisije stakleničkih plinova cjelokupnog cestovnog transporta računane su prema izrazu (5.3).

Selekcija scenarija. Prognostički parametri u potpoglavlju 5.3 sadrže tri različite prognoze obnavljanja flote koje se međusobno bitno razlikuju po intenzitetu (stupci (5a)/(6a), (5b)/(6b) i (5c)/(6c) u tablici 5.1.). Razlike se dobro vide usporede li se dijagrami na slici 5.9. Dodaju li se tome prognoze difuzije novih pogonskih sustava u tržište novih vozila pokazane slikama 5.12. i 5.13., dobiva se velik broj mogućih scenarija (slika 5.14.). *Promatra li se određena vremenska točka u budućnosti, temeljem različitih trendova i vizija može se formirati veliki broj vjerojatnih alternativnih budućnosti, odnosno scenarija.*¹¹⁰ U ovom mnoštvu odabrano je šest scenarija. Cilj je pokazati s kojim će se izazovima na području emisija cestovnog transporta Hrvatska suočiti kod ispunjavanja obvezujućega cilja smanjenja godišnjih emisija stakleničkih plinova do 2030. godine za 30 % u odnosu na 2005. [14].



Slika 5.14. Proces formiranja scenarija¹¹¹

Jedini službeni dokument koji se bavi budućim razvojem sektora cestovnog transporta u Republici Hrvatskoj je *Strategija prometnog razvoja Republike Hrvatske* (2017. - 2030.) koju je 2017. godine objavilo Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture [112]. Nažalost, niti jedna od ukupno 262 stranice ovog dokumenta ne sadrži bilo kakvu prognozu ili projekciju o tome kako će se razvijati transport do 2030. godine. Zbog toga su u ovoj analizi korištene

¹⁰⁹ HEV - hibridno električno vozilo (engl. *Hybrid Electric Vehicle*), PHEV – utično električno vozilo (*Plug-In Hybrid Electric Vehicle*), BEV – baterijsko električno vozilo (*Battery Electric Vehicle*).

¹¹⁰ Amberg et al. [111], str. 45.

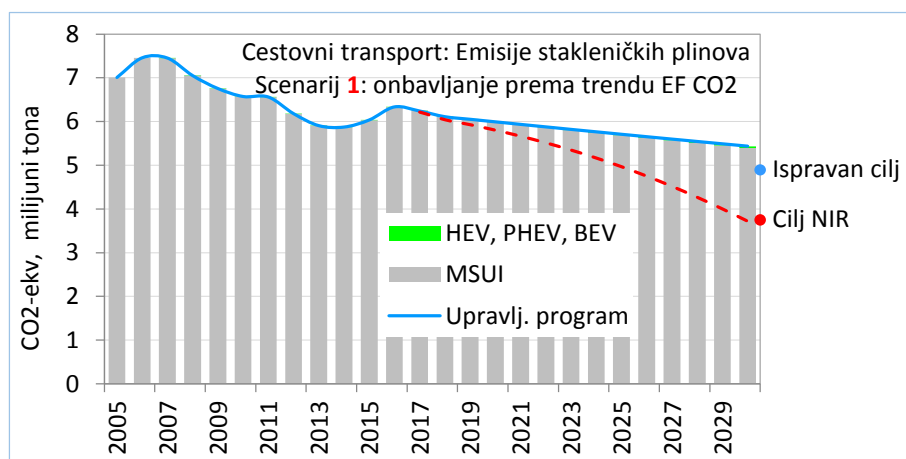
¹¹¹ Prijevod slike Abb. 2.7, Amberg et al. [111], str. 45.

dostupne procjene renomiranih svjetskih institucija o difuziji novih pogonskih tehnologija u sektor cestovnog transporta. Ova difuzija u flotu vozila M1 modelirana je preko difuzije vozila s novim pogonskim sustavima u područje prvi put registriranih vozila, primjenom S-krivulja opisanih u potpoglavlju 4.1.3 (str. 80). Iskušana su oba modela, logistički definiran izrazom (4.30) i Bass-ov (4.31). Bolji rezultati postignuti su s logističkim modelom i on je primijenjen u svim scenarijima, osim u scenariju 2 gdje su primijenjeni linearni trendovi.

SCENARIJ 1. Najsporije obnavljanje flote. Ne postoje nikakve mjere za upravljanje emisijama, flota se obnavlja do 2030. godine prema postojećem trendu prosječnog emisijskog faktora CO₂ flote M1.

Porast broja po prvi puta registriranih vozila je izrazito konzervativan (stupci (5c) i (6c) u tablici 5.1.), flota jedva da se obnavlja („Korigiran linearni trend“ na slici 5.8. i donji dijagram na slici 5.9.). Difuzija novih pogonskih sustava (HEV, PHEV, BEV) ostaje na zanemarivoj razini koja u prvi put registriranim vozilima 2030. godine iznosi oko 2 %. Ovakav koncept, u kojem je sve prepušteno slučaju, u engleskom se jeziku označava kraticom BAU (business as usual).

Rezultat je da su **emisije 46 % veće od ciljanih** („Cilj NIR“ na slici 5.15.), koje proizlaze iz emisija cestovnog transporta prijavljenih za 2005. godinu. Da su emisije u 2005. prijavljene u ispravnom iznosu („Ispravan cilj“), prekoračenje bi bilo manje od 11 %. U 2030. godini udio novih pogonskih sustava (HEV, PHEV, BEV) dostići će 2 % u novoregistriranim vozilima i 1 % u floti M1.



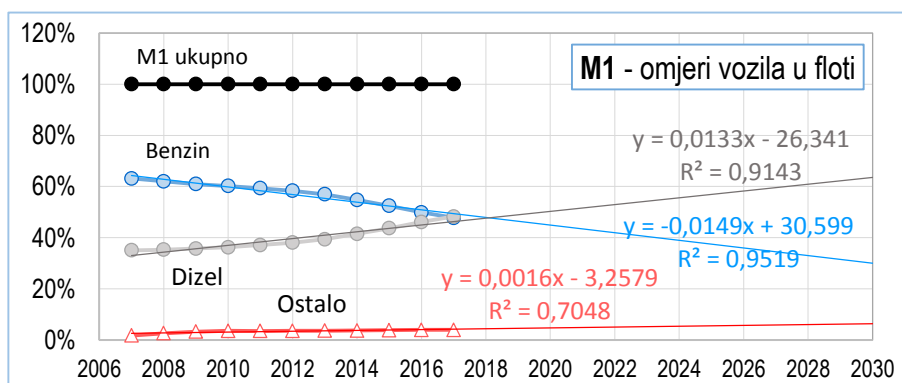
Slika 5.15. Scenarij 1: Prognoza emisija cestovnog transporta kod zadržavanja trenda EF CO₂

Plava krivulja, u dijagramima koji pokazuju emisije (npr. 5.15., 5.17. i slični), su emisije izračunate upravljačkim modelom (potpoglavlje 4.1.4. PODMODEL 3: Model za upravljanje emisijama). Stupci prikazuju emisije izračunate kao umnožak broja vozila, prosječnog godišnjeg puta vozila i emisijskog faktora (izraz (5.10)). Za istu emisiju u krajnjoj 2030. godini i upravljački model i izraz (5.10) daju rezultate koji se u svim scenarijima dobro poklapaju u cijelom prognostičkom razdoblju (u ovom slučaju od 2017. do 2030.). Time je pokazano da novorazvijeni model za upravljanje emisijama vjerno prikazuje kretanje budućih emisija. Točnost prognoza će se poboljšavati smanjivanjem prognostičkog intervala, odnosno

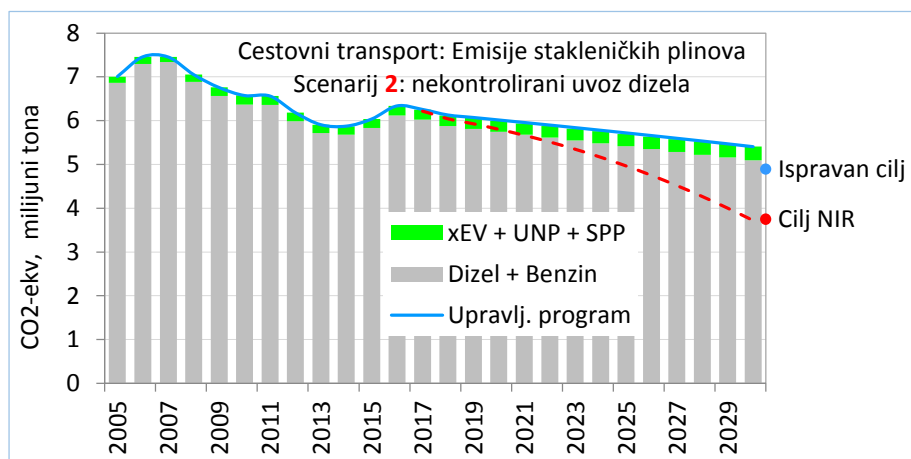
približavanjem posljednje tekuće godine¹¹² ciljnoj godini. **Crvena crtkana krivulja** pokazuje kako bi se prema upravljačkom modelu trebale kretati emisije da bi se postigla ciljana emisija.

SCENARIJ 2. *Ne postoje mjere za upravljanje emisijama, iz EU se uvoze putnički automobili pogonjeni Dieslovim motorima bez sustava selektivne katalitičke redukcije (SCR) kojima je zabranjen promet u gradovima razvijenih članica Unije.*

Udjeli automobila sa Ottovim i Dieslovim motorom mijenjaju se prema linearnim trendovima vrlo visokih vrijednosti koeficijenta determinacije R^2 (slika 5.16.). To odgovara **sporijem obnavljanju** flote (stupci (5b) i (6b) u tablici 5.1. te srednji dijagram na slici 5.9.). Sukladno tim projekcijama udio automobila sa Ottovim motorom u floti M1 opast će na približno 30 %, a udio automobila sa Dieslovim motorom će se povećati na više od 63 %. Prema *optimističkoj pretpostavci*, ostatak od oko 6 % su vozila čiji je emisijski faktor jednak onome hibridnih automobila (slika 5.11. i tablica 5.1.).



Slika 5.16. Scenarij 2: projekcije udjela vozila prema vrstama goriva do 2030. godine.



Slika 5.17. Scenarij 2: Emisije kod zadržavanja trendova omjera Automobila sa Ottovim i Dieslovim motorom.

Rezultat na slici 5.17. pokazuje da su emisije u ciljnoj 2030. godini neznatno opale, ali su još uvijek **45 % veće od ciljane granice** (NIR). Prekoračenje bi iznosilo samo 10 % da su prijavljene ispravne emisije u referentnoj 2005. godini.

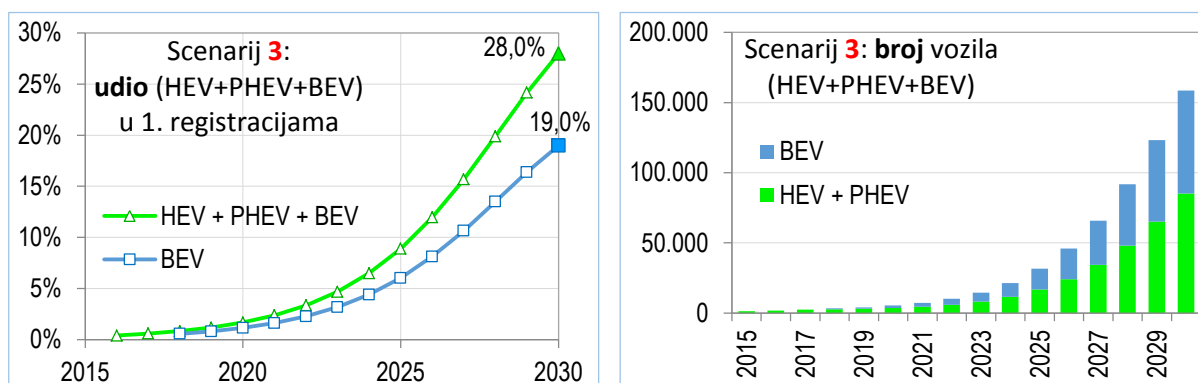
¹¹² Posljednja godina za koju postoje svi podaci za izračun emisija modelom COPERT 5 (potpoglavlje 4.1.1.).

SCENARIJ 3. Brže obnavljanje flote.¹¹³ Difuzija hibridnih električnih vozila (HEV) i utičnih hibridnih električnih vozila (PHEV) u 2030. godini u prvi put registriranim vozilima dostiže 28 %, što odgovara Bloombergovoj prognozi (slika 5.13.).

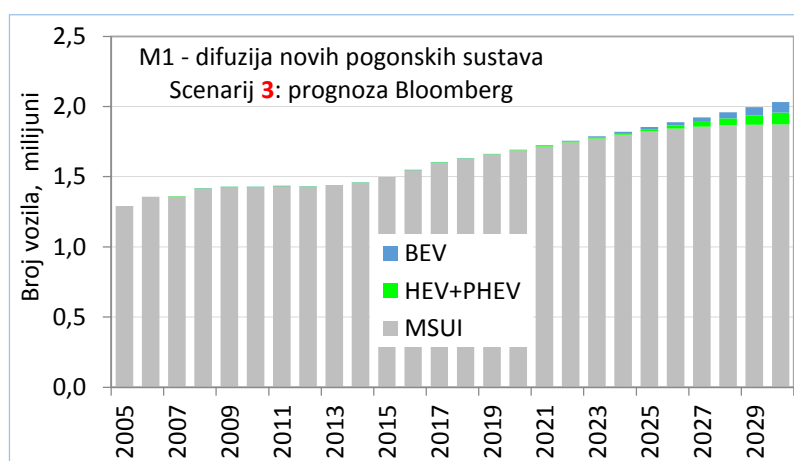
U Bloombergovoj prognozi ovih 28 postotnih poena se sastoji od tri skupine (utična električna vozila PHEV, baterijska električna vozila BEV i hibridna električna vozila HEV) koje su raspodijeljene na ovaj način:

$$28 \% = (5,5 + 19 + 3,5) \% = (\text{PHEV} + \text{BEV} + \text{HEV}) \text{ u } 2030.$$

Ishodi analize prema ovom scenariju pokazani su na slikama 5.18. do 5.20.

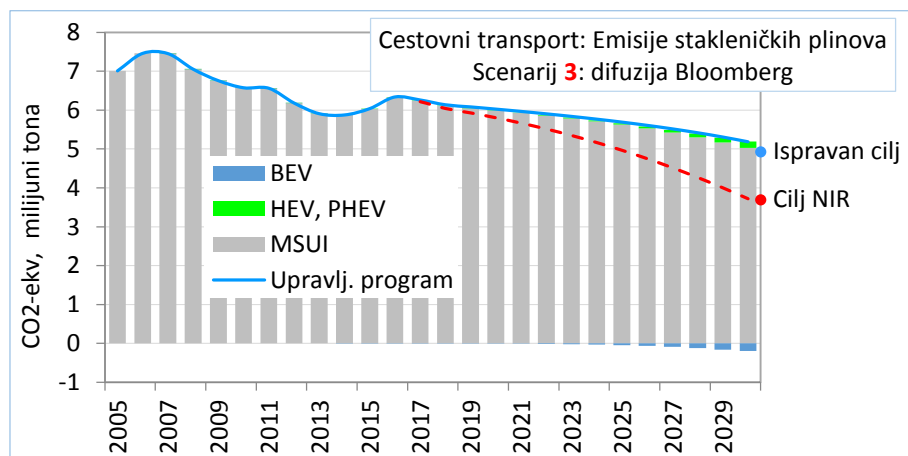


Slika 5.18. Scenarij 3: Udio novih sustava u prvi put registriranim vozilima (lijevo) i njihov broj u floti M1 (desno)



Slika 5.19. Scenarij 3: Broj vozila u hrvatskoj floti M1

¹¹³ Tablica 5.1., stupci (5a) i (6a): prognoza broja prvi put registriranih vozila prema korigiranom trendu, prognoza broja otpadnih vozila prema izrazu (5.9) (vidi i gornji dijagram na sl. 5.9.).



Slika 5.20. Scenarij 3: Emisije stakleničkih plinova cjelokupne flote cestovnih vozila. Plavi stupci pokazuju smanjenje emisija uslijed difuzije baterijskih električnih vozila umjesto vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem. Emisije iznad crvene crtkane krivulje su premašaj koji onemogućava ciljane vrijednosti u 2030. godini.

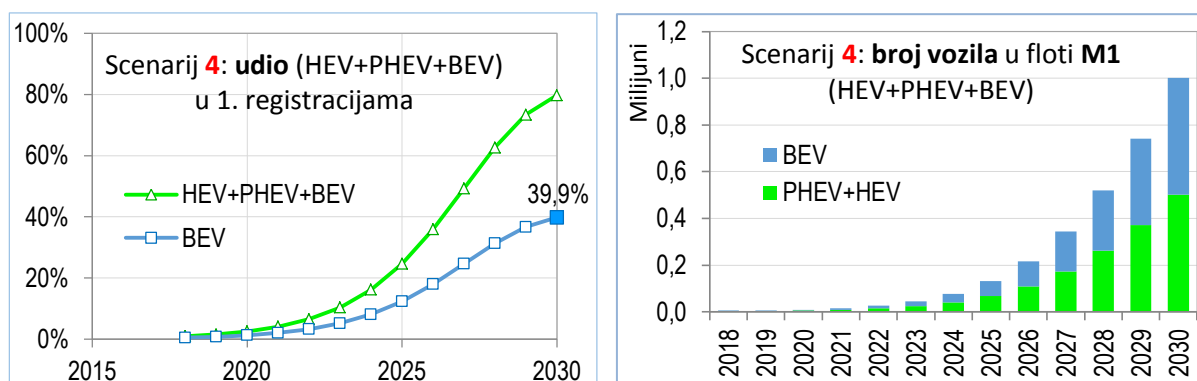
Rezultat. Premda su prvi put registrirana vozila u floti M1 2030. godine dostigla brojku od gotovo 386 tisuća vozila (19 % od M1), od kojih je više od 73 tisuće baterijskih električnih vozila a gotovo 35 tisuća hibridnih, emisije u ciljnoj 2030. godini **su još uvijek 39 % veće od ciljane vrijednosti** (NIR). Da su u referentnoj 2005. godini prijavljene ispravne emisije, emisije flote bile bi samo 6 % veće od ciljanih.

SCENARIJ 4. Brže obnavljanje flote.¹¹³ *Difuzija hibridnih i električnih vozila u omjeru (1:1) u 2030. godini, u prvi put registriranim vozilima dostiže razinu dovoljnu da se emisije cestovnog transporta spuste na ciljanu vrijednost (NIR).*

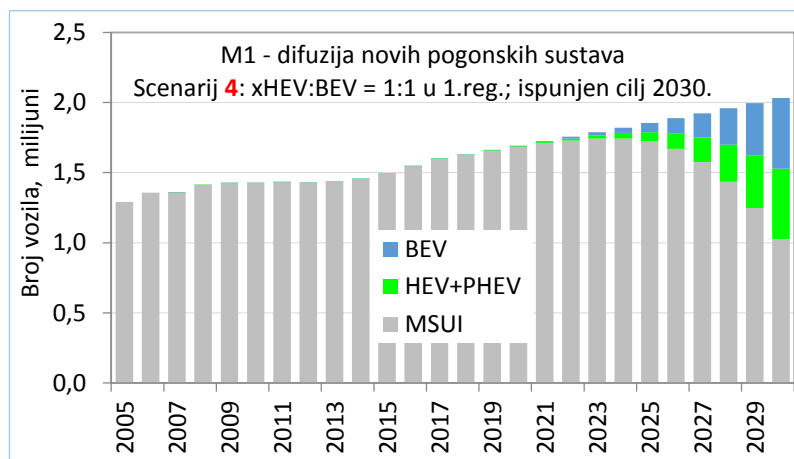
Primjenom logističkog modela difuzije (izraz (4.28)) dobiveni su ishodi pokazani na slikama 5.21. do 5.23.

U 2030. godini sastav flote M1 je sljedeći: 50,5 % vozila su na pogon MSUI, 24,8 % su hibridna električna vozila (HEV + PHEV) i 24,7 % baterijska električna vozila (BEV).

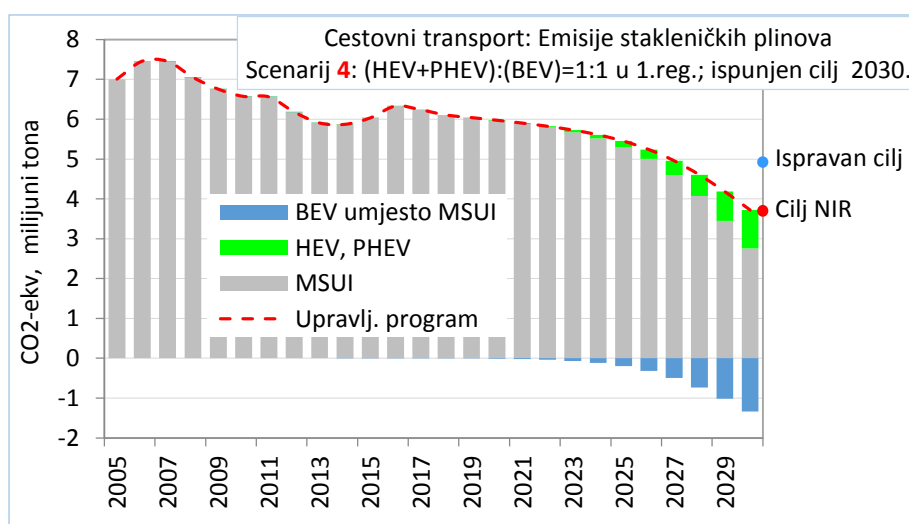
Od toga 19,0 % čine prvi put registrirana vozila, a otpad je iznosio 17,19 % od broja registriranih vozila M1 u 2030.



Slika 5.21. Scenarij 4: Udio novih sustava u prvi put registriranim vozilima (lijevo) i njihov broj u floti M1 (desno)



Slika 5.22. Scenarij 4: Broj vozila u hrvatskoj floti M1



Slika 5.23. Scenarij 4: Emisije stakleničkih plinova cjelokupne flote cestovnih vozila. Plavi stupci pokazuju smanjenje emisija uslijed difuzije baterijskih električnih vozila umjesto vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem.

Rezultat. Cilj je ispunjen, ali su difuzija i udio novih pogonskih sustava u floti dostigli nevjerojatno visoke vrijednosti.

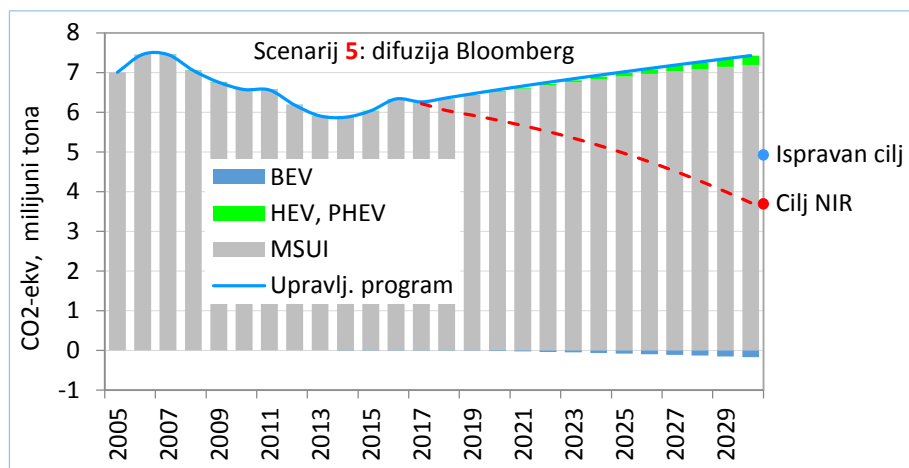
Mogući nedostatak scenarija 1. do 4.

Prema prognozi ARIMA prosječan godišnji put trebao bi opasti od 13 tisuća kilometara u 2016. godini na tek nešto više od 9 tisuća u 2030. Posljedica je to malog broja povijesnih podataka koji imaju silazni trend, a funkcijom ARIMA to je uzeto u obzir i protegnuto u budućnost. Ova pesimistička prognoza može se objasniti time što raste broj domaćinstava koja imaju po dva ili više vozila, kao što je npr. slučaj u ruralnim područjima sa slabim javnim prijevozom gdje se do posla može putovati jedino automobilom. Ta vozila voze godišnje tek neznatno više od minimuma potrebnog za putovanje do radnog mjesta. Međutim, pretpostavi li se da na tržištu energenata neće biti većih potresa, te da će standard ipak dovoljno rasti, mogla bi se zadržati sadašnja vrijednost prosječnog godišnjeg puta.

Zbog toga je u iduća dva scenarija primijenjen prosječan godišnji put vozila M1 od 13.000 km u cijelom prognostičkom razdoblju.

SCENARIJ 5. Brže obnavljanje flote.¹¹³ *Prosječan godišnji put vozila flote M1 iznosi u cijelom prognostičkom razdoblju 13.000 km, tj. kao u 2017. godini. Difuzija novih pogonskih sustava ista je kao u scenariju 3, tj. u 2030. godini udjeli u prvi put registriranim vozilima su: (HEV+PHEV) + BEV = 9 + 19 = 28 %, što je sukladno Bloombergovoj prognozi (slika 5.13.).*

Rezultati difuzije novih pogonskih sustava su identični onima u scenariju 3., a emisije su pokazane na slici 5.24.



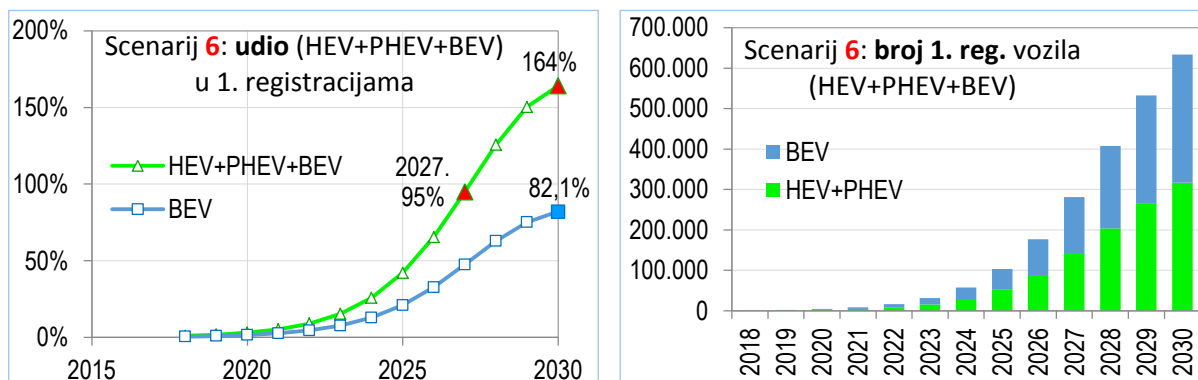
Slika 5.24. Scenarij 5: Emisije stakleničkih plinova cjelokupne flote cestovnih vozila. Plavi stupci pokazuju smanjenje emisija uslijed difuzije baterijskih električnih vozila umjesto vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem.

Rezultat. Struktura vozila ista je kao u scenariju 3 (slike 5.18. i 5.19.). Prvi put registrirana vozila u floti M1 2030. godine dostigla su brojku od gotovo 386 tisuća vozila (19 % od M1), od kojih je više od 73 tisuće baterijskih električnih vozila, a gotovo 35 tisuća hibridnih. U ovom scenariju, koji je po prosječnom godišnjem putu vozila znatno bliži realnosti, emisije u ciljnoj 2030. godini **premašile su ciljanu vrijednost (NIR) za punih 100 %**. Čak i da su u referentnoj 2005. godini prijavljene ispravne emisije, emisije flote bile bi nedostižnih 52 % veće od ciljanih. *Ovaj scenarij jasno pokazuje da država u kojoj je stanovništvo relativno siromašno i koja nema praktički nikakvih poticajnih mjera za nabavku vozila s novim pogonskim sustavima, nema šansu smanjiti emisije cestovnog transporta na ciljanu vrijednost.*

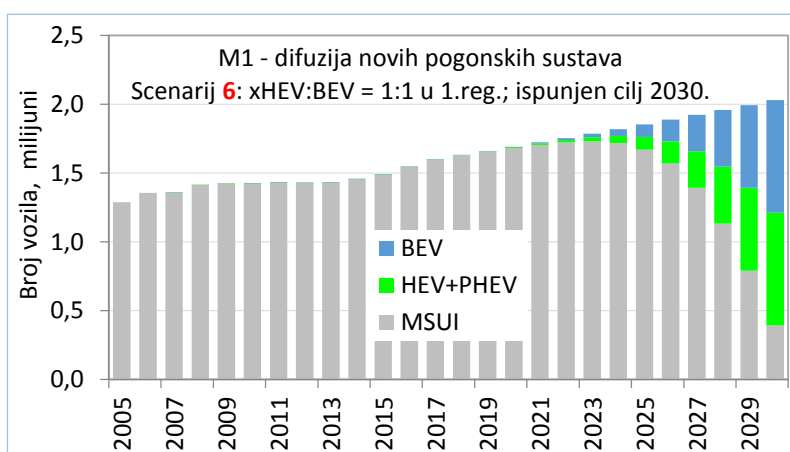
SCENARIJ 6. Brže obnavljanje flote.¹¹³ *Prosječan godišnji put vozila flote M1 iznosi u cijelom prognostičkom razdoblju 13.000 km, tj. kao u 2017. godini. Difuzija hibridnih i električnih vozila u omjeru (1:1) u 2030. godini, u prvi put registriranim vozilima, dostiže razinu dovoljnu da se emisije cestovnog transporta spuste (kao u scenariju 4.) na ciljanu vrijednost (NIR).* Ishodi su pokazani na slikama 5.25. do 5.27.

Rezultat. Dijagram na slici 5.25. lijevo pokazuje da već u 2027. godini udio novih vozila (xEV) dostiže 95 % prvih registracija prema modelu „bržeg obnavljanja flote“, a u 2030. čak 164 %. To znači da bi tada vozila prve registracije bila samo (HEV + PHEV + BEV) i njihov broj bi bio 64 % veći od ukupno prognozirano. Sukladno tome, u 2030. godini sastav flote M1 bio bi sljedeći: samo 19,4 % vozila na pogon MSUI, 40,4 % hibridnih električnih vozila (HEV + PHEV)

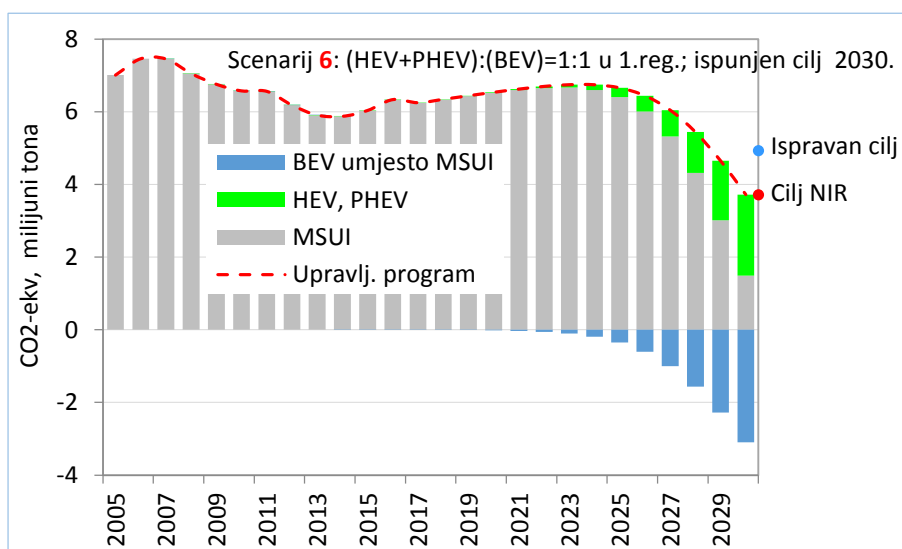
i 40,3 % baterijskih električnih vozila (BEV). Udio prvi put registriranih vozila (HEV + PHEV + BEV) narastao bi na 31 % od ukupnog broja vozila M1. Dakle, uvjeti pod kojima bi cilj bio ispunjen premašuju sve granice zamislivog.



Slika 5.25. Scenarij 6: Udio novih sustava u prvi put registriranim vozilima (lijevo) i njihov broj u prvi put registriranim vozilima M1 (desno)

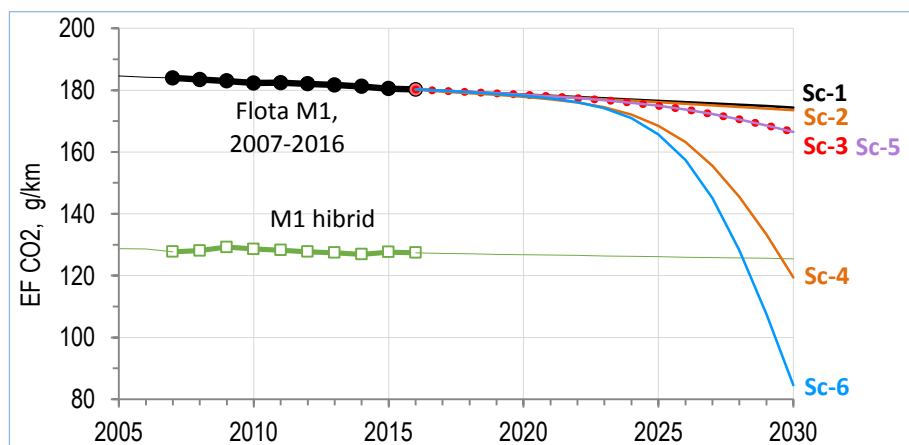


Slika 5.26. Scenarij 6: Broj vozila u hrvatskoj floti M1.

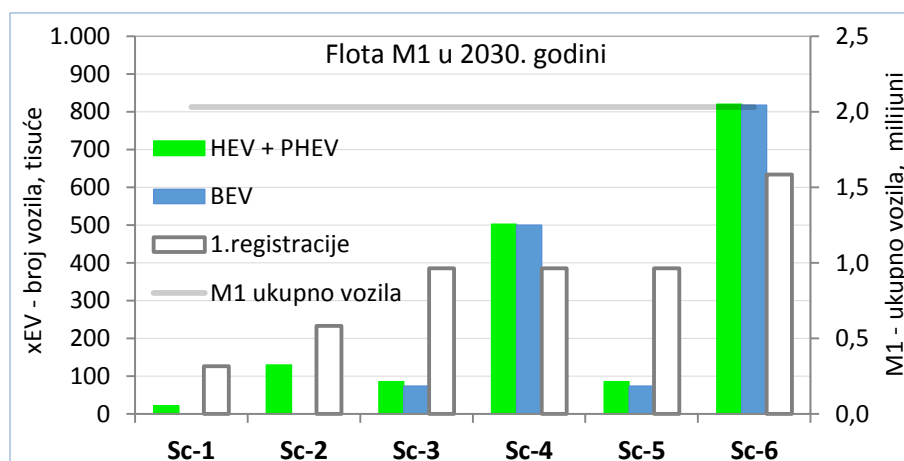


Slika 5.27. Scenarij 6: Emisije stakleničkih plinova cjelokupne flote cestovnih vozila. Plavi stupci pokazuju smanjenje emisija uslijed difuzije baterijskih električnih vozila umjesto vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem.

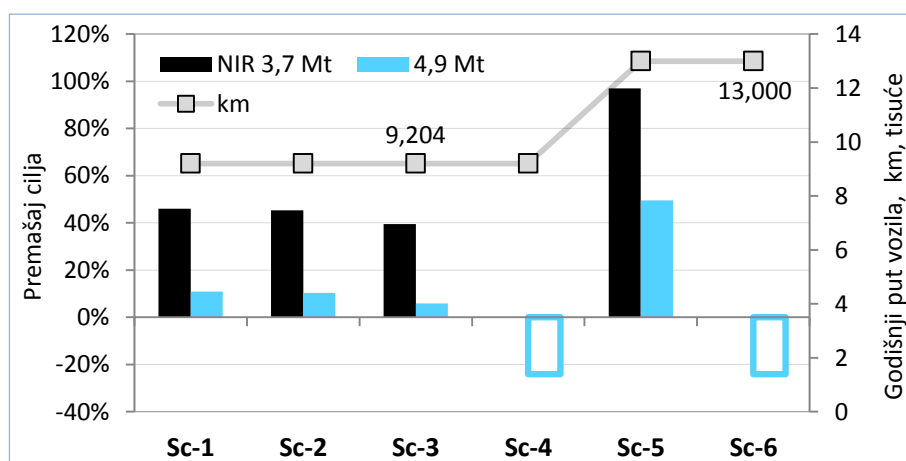
SAŽETAK SVIH SCENARIJA



Slika 5.28. Emisijski faktori flote M1 u svih šest scenarija.



Slika 5.29. Hrvatska flota u 2030. godini. Scenarij 1: zeleni stupac sadrži sva xEV (HEV+PHEV+BEV). Scenarij 2: zeleni stupac sadrži (xEV+UNP). 1. registracije su na lijevoj skali.

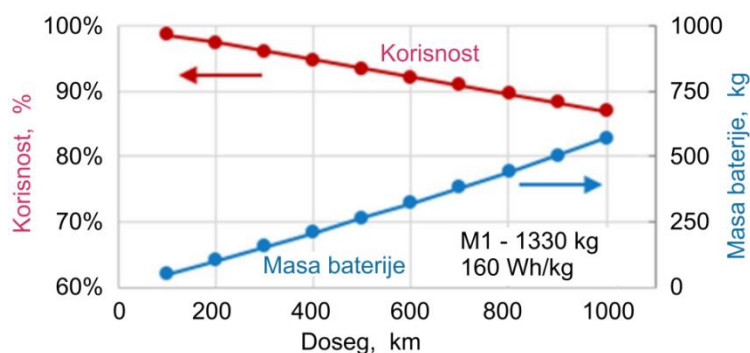


Slika 5.30. Emisije cestovnog transporta u 2030. godini: crni stupci u odnosu na ciljanu vrijednost NIR od 3,7 Mt CO₂-ekv; plavi stupci u odnosu na ispravnu ciljanu vrijednost od 4,9 Mt CO₂-ekv. Scenariji 4 i 6 (Sc-4 i Sc-6) postižu ciljanu vrijednost NIR, a ispod su ispravne ciljane vrijednosti. Siva krivulja je prosječan godišnji put vozila u 2030. godini u pojedinim scenarijima.

Krivulje emisijskih faktora (slika 5.28.) scenarija 3. i 5. se podudaraju, jer su sastavi flote identični, a samo je prosječan godišnji put vozila povećan s 9.204 km (u Sc-3) na 13.000 km (u Sc-5), kako je pokazano na sl. 5.30. Emisijski faktori scenarija 4 i 6 izrazito intenzivno opadaju, jer su u tim scenarijima emisije spuštene na ciljanu vrijednost koja proizlazi iz emisija objavljenih u NIR-u (vidi 5.1 i 5.2.). U scenariju 6. broj po prvi puta registriranih vozila u 2030. premašuje 633 tisuće, što iznosi 31 % ukupnog broj vozila u floti. Jedini scenarij u kojemu je udio po prvi puta registriranih vozila na sadašnjoj razini je scenarij 1.

5.6. Izgledi za difuziju novih tehnologija u Hrvatsku

Prema sadašnjem načinu evidentiranja emisija stakleničkih plinova od cestovnog transporta, baterijska električna vozila ne emitiraju stakleničke plinove. Ovo bi bilo točno samo kad bi ta vozila trošila električnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora. S obzirom na to da nije tako, emisije stakleničkih plinova električnih vozila samo su premještene u elektrane. Usprkos svojoj velikoj prividnoj prednosti u pogledu ovih emisija, veliku prepreku bržoj difuziji električnih vozila predstavljaju dva nedostatka. *Prvi* je mali doseg, veliko vrijeme punjenja ispražnjene baterije i nedostatak infrastrukture koja bi omogućavala upotrebu velikog broja električnih vozila. Za povećanje dosega, vozila se opremaju sve većim baterijama. To međutim povećava ukupnu masu i smanjuje udio korisnog tereta pa zbog toga opada korisnost električnih vozila (slika 5.31.).



Slika 5.31. S porastom mase baterije raste doseg električnog vozila, ali opada korisnost¹¹⁴

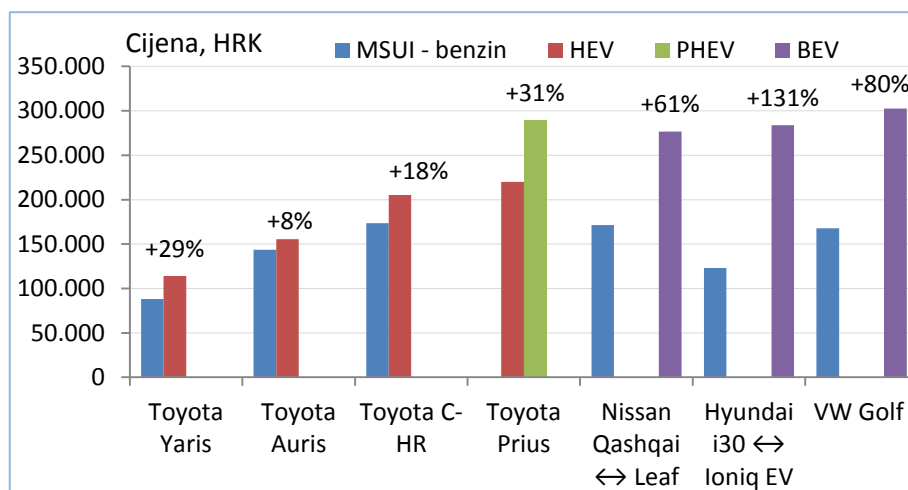
Drugi nedostatak su cijene hibridnih električnih vozila (HEV), utičnih hibridnih električnih (PHEV) i baterijskih električnih vozila (BEV). One su u Hrvatskoj od 8 % do 131 % veće od ekvivalentnih automobila s Ottovim motorom (slika 5.32.5.32.). S druge strane, prema podacima Eurostata, Hrvatska je prema visini BDP-a u 2017. godini bila na pretposljednem mjestu u Europskoj uniji, BDP je iznosio samo 61 % od prosjeka EU, i samo 57 % od prosjeka Euro-zone (slika 5.33.). Iza nas je samo Bugarska. Trebalo bi se dogoditi u doslovnom smislu te riječi, čudo, da dostignemo npr. Sloveniju. Nadalje, Hrvatska se na karte Europe percipira kao zemlja u kojoj se ne daju poticaji za vozila s novim tehnologijama¹¹⁵ [114], dok to druge

¹¹⁴ Primjer se odnosi na vozilo veličine VW Golfa. Izvor: Izvještaj European Roadmap Electrification of Road Transport, 2017, str. 17, Europskog savjetodavnog vijeća za istraživanje cestovnoga prometa ERTRAC (The European Road Transport Research Advisory Council) [113].

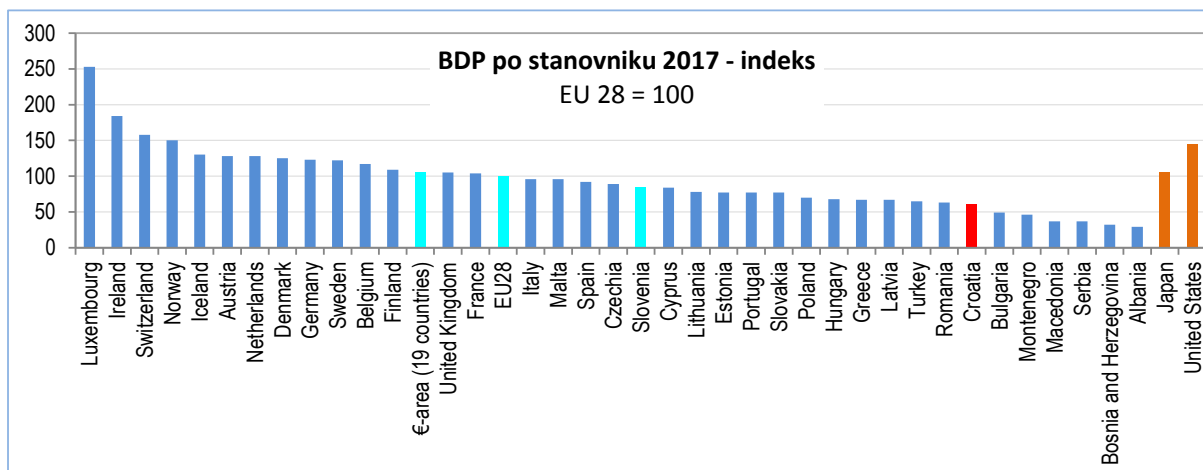
¹¹⁵ Interactive map: Electric vehicle incentives per country in Europe, ACEA, [114].

Premda je tijekom proteklih godina Vlada RH povremeno dodjeljivala poticaje za nabavku električnih i

zemlje uspješno provode [115], [116]. Sasvim je nevjerojatno da bi u Hrvatskoj difuzija novih tehnologija u sektoru cestovnog transporta višestruko premašila vrijednosti koje su prognozirane za najrazvijenije države. Uzme li se u obzir sve navedeno, za Hrvatsku je najizgledniji scenarij 2. Umjesto novih automobila s pogonskim sustavima niskih emisija, mnogo je vjerojatnije da će hrvatskim građanima postati vrlo primamljivi automobili sa Dieselovim motorom Euro 5 koji nisu opremljeni sustavima za pročišćavanje čestica pomoću selektivne katalitičke redukcije i kojima se zbog toga zabranjuje promet u sve više europskih gradova te im pada cijena.



Slika 5.32. Cijene putničkih automobila, s novim pogonskim sustavima, u Hrvatskoj na dan 22.10.2018. godine¹¹⁶



Slika 5.33. BDP prema podacima Eurostata¹¹⁷.

hibridnih vozila, to je uvijek trajalo veoma kratko i učinci su bili nedovoljni da na navedenoj internetskoj karti Europe promijene oznaku Hrvatske kao zemlje u kojoj nema poticaja.

¹¹⁶ Cijene se odnose na najbližnju, najjeftiniju opremu koja postoji u obje uspoređene izvedbe. Izvor: hrvatske internetske stranice proizvođača, stanje na dan 22.10.2018.

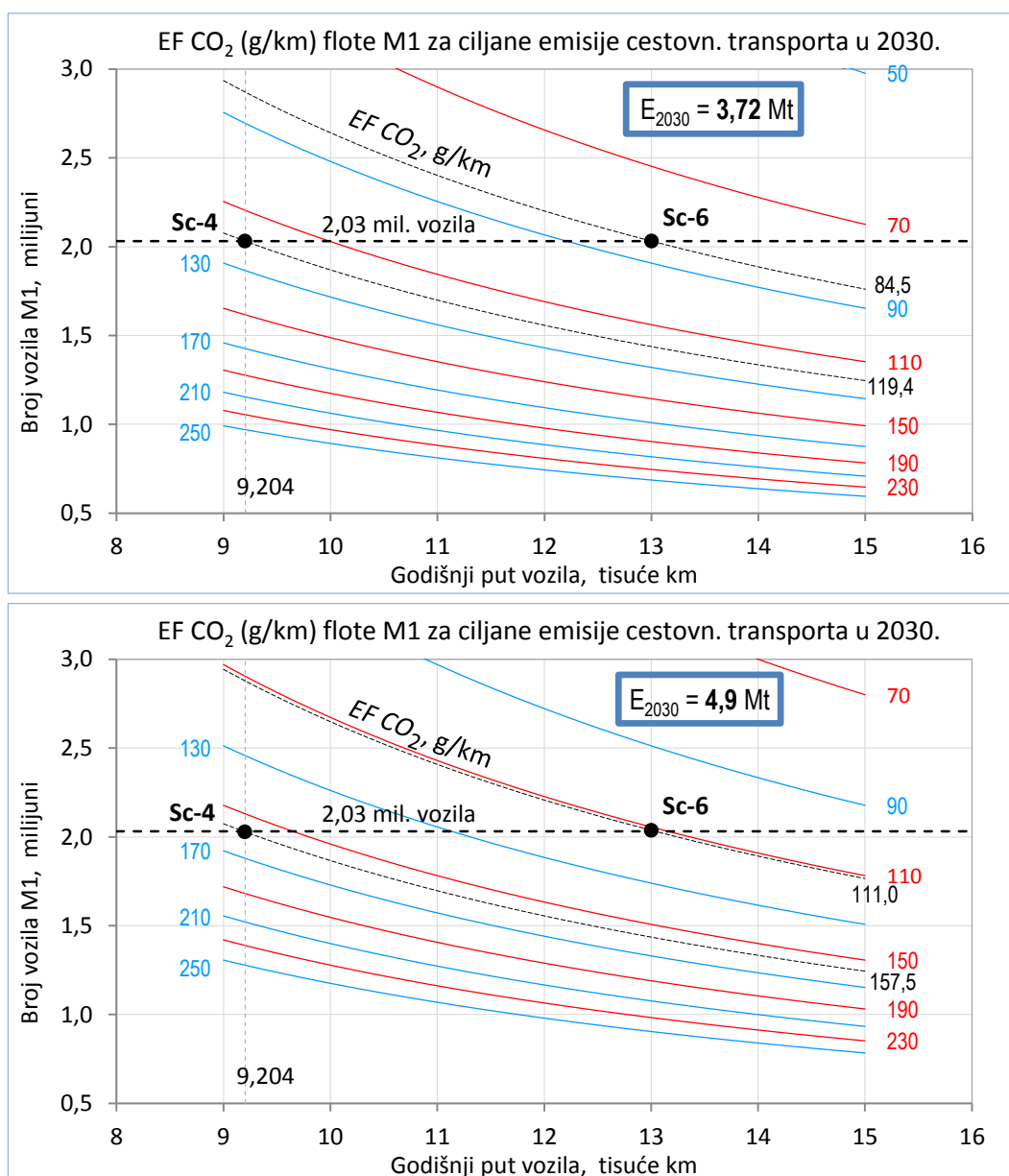
¹¹⁷ <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=tec00114>, pristup: 22.10.2018.

5.7. Emisijski indikatori

Emisije cjelokupnog cestovnog transporta mogu se pratiti pomoću tri emisijska indikatora flote M1. Ta tri indikatora su: broj vozila N_j , prosječan godišnji puta vozila s_j , km i emisijski faktor $EF CO_2$, g/km. Jednadžba (5.10) može se napisati u obliku:

$$N_j = \frac{E_j}{s_j \cdot EF CO_2} \quad (5.11)$$

Uvrsti li se za E_j emisijska granica cestovnog transporta reducirana na flotu M1, ovom se jednadžbom za svaku E_j može izračunati familija krivulja konstantnog emisijskog faktora pokazana na dijagramima 5.34.



Slika 5.34. Tri emisijska indikatora flote M1 (broj vozila, godišnji put vozila i emisijski faktor) za dvije ciljane emisije cjelokupnog cestovnog transporta E_{2030} s ucrtanim točkama dvaju uspješnih scenarija Sc-4 i Sc-6.

Za poznati broj vozila flote i za poznat prosječni godišnji put vozila, iz dijagrama se odmah može utvrditi potreban prosječan emisijski faktor flote za postizanje emisijske granice E_j . Emisijski faktori, pretočeni u ovakve dijagrame, predstavljaju jednostavan i učinkovit alat za utvrđivanje emisijskog faktora potrebnog za ostvarivanje godišnjih emisija cestovnog transporta. Redovitim praćenjem trendova u kojima se kreću ova tri indikatora dobit će se vrijedne informacije o poticajnim mjerama koje treba donijeti da bi se obnavljanje flote usmjerilo prema ciljanim emisijama u 2030. godini.

5.8. Zaključci

Provedena scenarijska analiza pokazuje sljedeće: da bi se do 2030. godine dostiglo obvezujuće smanjenje emisija stakleničkih plinova cestovnog transporta od 30 % u odnosu na 2005. godinu, nužno je ispuniti dva uvjeta:

1. Prijavljene emisije u 2005. godini treba podići na realan iznos.

Za izračun emisija CO₂ u izvješću NIR primjenjuje se emisijski model najniže razine Tier 1, a za emisije CH₄ i N₂O, čiji je udio u usporedbi s udjelom CO₂ zanemariv¹⁰⁰, primijenjen je model Tier 2. Na ovaj su način za 2005. godinu izračunate emisije od: 5,314 Mt CO₂-ekv.

Modelom COPERT 5, koji je najviše razine Tier 3, u ovom su radu za 2005. godinu izračunate emisije u iznosu od:

7,004 Mt CO₂-ekv.

S obzirom na to da su emisijski modeli i emisijski faktori usklađeni tako da s povećanjem razine raste točnost rezultata i to na način da je rezultat najviše razine ujedno i najmanji, očigledno je da je u izvješću NIR prijavljen pogrešan, daleko prenizak iznos emisija koji sada čini apsolutno nemogućim ispunjenje obvezujućeg cilja. Uzme li se u obzir primijenjena metodologija Tier 1, u izvješću NIR bi emisije cestovnog transporta u 2005. godini trebale iznositi barem:

8 Mt CO₂-ekv.

2. Što je moguće žurnije, treba donijeti učinkovite poticajne mjere koje će stimulirati kupnju električnih hibridnih i nadasve baterijskih vozila. Pritom treba imati na umu važnu činjenicu da za tranziciju na nove tehnologije treba predvidjeti dovoljno vremena kako bi se procesi mogli kontrolirati i da bi se izbjegli potresi. Na ovo posebno upozoravaju Hanson et al. [117]¹¹⁸.

Ako se to ne dogodi, a nevjerojatno je da bi se dogodilo, moguća su dva ishoda. Prvi je da se cijena motornih goriva povisi toliko da će se prosječan godišnji put vozila smanjiti toliko da ukupne emisije opadnu ispod ciljane vrijednosti. Drugi ishod jest da se kazne za prekoračenje, za koje još nije poznato kolike će biti, plaćaju novcem poreznih obveznika, onih istih čiji je BDP po glavi stanovnika na pretposljednem mjestu u Europskoj uniji.

¹¹⁸ U citiranom radu autori su pokazali razvoj metoda prijelaza na nove tehnologije uz minimalne napore. Razmatrali su kontrolu procesa, troškove i investicije. Cilj je bio razvoj metoda za kreiranje upravljačkih politika.

6. ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Cilj ovog istraživanja bio je razvoj brzog modela za predviđanje emisija cestovnog transporta kojim bi se omogućilo učinkovito praćenje tih emisija i njihovo usmjeravanje prema obvezujućim ciljevima koji proizlaze iz Kyoto protokola i na temelju njega donesenih obvezujućih dokumenata. Za procjenu emisija cestovnog transporta u Europi se primjenjuju programi najviše razine Tier 3, kao što su npr. COPERT 5 i HBEFA. Njihova primjena zahtijeva značajne ljudske i računalne resurse, što prognoziranje primjenom ovakvih programa čini veoma skupim za svaku kalendarsku godinu. Za brze analize i naročito za one scenarijske, potreban je znatno jednostavniji i brži alat koji će pružiti odgovarajući broj dovoljno točnih rezultata za izvođenje zaključaka o političkim mjerama koje treba donijeti za postizanje ciljanih emisija u ciljanoj godini. Postavljena je hipoteza da se temeljem analize emisijske strukture i emisijskih parametara flote mogu uspostaviti funkcijski odnosi između tih parametara i emisija flote te izraditi model koji će to omogućiti.

6.1. Pregled i glavni rezultati rada

Rad na ovoj temi obuhvatio je četiri osnovne cjeline koje su sadržane u četiri poglavlja ovoga rada.

U **prvoj cjelini**, odnosno u drugom poglavlju, analizirana su dosadašnja istraživanja u području modeliranja emisija cestovnih motornih vozila i cestovnog transporta te rubnih uvjeta koje te emisije moraju zadovoljiti.

Drugu cjelinu, treće poglavlje, čine podaci o hrvatskoj floti cestovnih motornih vozila i njihova analiza. Flota vozila M1, koja je osnovom procjene emisija cjelokupnog cestovnog transporta, analizirana je u razdoblju od 2007. do 2017. godine. Analizom je utvrđena emisijska struktura flote (Euro *n*), struktura s obzirom na starost vozila, na pogonsko gorivo (benzin, dizelsko gorivo, UNP, SPP, hibridna i električna vozila), s obzirom na prevoženi put, emisije i emisijske faktore štetnih sastojaka i stakleničkih plinova. Također su utvrđeni svi relevantni parametri profila prosječnog vozila. Osobito vrijedan podatak, stanje putomjera, bilježi se od 2007. godine prilikom redovitog tehničkog pregleda koji prethodi registraciji vozila. Temeljem ovog podatka izračunat je godišnji put svakog pojedinog vozila u floti, čime je omogućeno točno izračunavanje godišnjih emisija flote. Ovom analizom određeni su svi potrebni podaci za izračunavanje emisija flote programom COPERT 5, koji se u tu svrhu u

većini europskih zemalja primjenjuje kao standardni alat čiji se rezultati šalju nadležnim međunarodnim tijelima.

U **trećoj cjelini**, odnosno u četvrtom poglavlju, prikazan je razvoj modela za upravljanje emisijama cestovnog transporta MOCET. On se sastoji od tri podmodela. *Prvi podmodel* služi za izračun emisijskih faktora i detaljnu procjenu emisija cestovnog transporta i u tu svrhu je primijenjen program COPERT 5. *Drugi podmodel* je podijeljen u dva dijela: prognostički dio i scenarijski dio. U prvom, prognostičkom dijelu, primijenjene su dvije različite metode: regresijska analiza i metoda vremenskih nizova ARIMA. Rezultati ovog prvog dijela su prognoze emisijskih faktora, broja vozila i prosječnog godišnjeg puta vozila te indikatori emisija flote u cjelini. Također su za potrebe scenarijske analize rekonstruirani stanje flote i iznosi njenih emisija u 2005. godini, koja je referentna za obvezujuće smanjenje emisija do 2030. U drugome dijelu drugoga podmodela modelirana je difuzija novih pogonskih sustava xEV¹¹⁹ u tržište novih vozila i time u postojeću flotu. *Treći podmodel* služi za upravljanje emisijama flote prema željenom cilju u odabranoj godini, uz pretpostavljene emisijske parametre godišnje obnavljanoga dijela flote. U tu su svrhu uvedena tri emisijska indikatora: broj vozila, prosječan godišnji put vozila i prosječan emisijski faktor ugljikovog dioksida. Za dostizanje ciljane emisije, uz odabrani model obnavljanja flote, ovaj podmodel pokazuje koliko mora iznositi emisijski faktor flote, ako su poznata druga dva indikatora. Podmodel koristi vlastiti, novo razvijeni algoritam. Njegova je primjena pokazana na odabranom primjeru. Također je pokazana čvrsta korelacija između emisija ugljikovog dioksida flote M1 i emisija stakleničkih plinova cjelokupnog cestovnog transporta. Time je omogućeno da se emisije cjelokupnog cestovnog transporta vrlo pouzdano procijene na temelju emisija flote M1.

Četvrta cjelina, odnosno peto poglavlje, sadrži scenarijsku analizu. Na odabranim scenarijima pokazano je pod kojim bi uvjetima Hrvatska mogla ispuniti obvezu smanjenja emisija stakleničkih plinova iz cestovnog transporta za 30 % do 2030. godine, u odnosu na emisije u 2005. godini. Pokazano je da su emisije u referentnoj 2005. godini pogrešno određene te da je kao posljedica toga granična emisija u 2030. najmanje 32 % preniska. Izrađena su tri scenarija obnavljanja flote M1 i pokazane su prognoze difuzije novih pogonskih sustava u prodaju novih vozila u svijetu. Ovi podaci su primijenjeni u šest scenarija kretanja emisija u kojima se analiziraju izgledi da Hrvatska ispuni svoju obvezu. U prvom scenariju je promatrana situacija u kojoj se flota obnavlja stihijski, kao i do sada. U drugom je pretpostavljeno da će se iz Europske unije povećati uvoz rabljenih putničkih automobila pogonjenih Dieslovim motorima bez sustava selektivne katalitičke redukcije (SCR) kojima je već zabranjen transport u gradovima razvijenih članica Unije. Rezultati pokazuju da će granične emisije biti premašene za 46 % u prvom scenariju, odnosno za 45 % u drugom. U trećem scenariju je pretpostavljena difuzija xEV (prema trenutno relevantnim projekcijama [110]), koja će u prvi put registriranim vozilima narasti na ukupno 28 % do 2030. I u ovom bi slučaju cilj bio premašen i to za 39 %. U četvrtom je scenariju udio xEV u prvim registracijama povećavan toliko da se u 2030. ispuni cilj. U ciljnoj godini to bi rezultiralo udjelom xEV u floti

¹¹⁹ xEV = HEV (hibridna električna vozila) + PHEV (utična električna vozila) + BEV (baterijska električna vozila).

M1 od 49,5 %. U petom i šestom scenariju prosječan godišnji put vozila M1 u 2030. godini povećan je od 9.300 km (prognoziranih matematičkim modelom) na 13.000 km (podatak za 2017.). U petom scenariju primijenjena je ista difuzija kao u trećem, a cilj je premašen za punih 100 %. U šestom scenariju je opet postavljen zahtjev ispunjenja cilja, što je rezultiralo time da bi u 2030. samo 19,4 % flote M1 činila klasična vozila pogonjena motorima s unutarnjim izgaranjem. Procijenjeni su izgledi Hrvatske za ispunjenje ovog cilja i dane su preporuke o mjerama koje bi u tom smislu trebalo poduzeti. Na kraju je pokazano kako se emisije cjelokupnog cestovnog transporta mogu jednostavno pratiti pomoću tri emisijska indikatora flote M1: broja vozila, prosječnog godišnjeg puta vozila i emisijskog faktora.

6.2. Potvrđivanje hipoteza

Petim poglavljem pokazano je da su u potpunosti potvrđene hipoteze postavljene na početku rada, tj. da se na temelju podataka o strukturi flote vozila mogu definirati funkcijski odnosi između emisijske strukture i emisija flote te da se na temelju tih odnosa može izraditi matematički model kojim će se moći dovoljno točno prognozirati budući razvoj emisija. Razvijeni model i uvedeni emisijski parametri omogućuju učinkovito praćenje kretanja emisija prema postavljenom cilju i donošenje zaključaka o mjerama koje za to treba donijeti, čime su ispunjeni i postavljeni ciljevi.

6.3. Izvorni znanstveni doprinos

Provedena istraživanja i rad tijekom izrade ove disertacije rezultirali su sljedećim znanstvenim doprinosima u području modeliranja emisija cestovnog transporta:

- Definirani su temeljni funkcijski odnosi između parametara flote vozila i emisija flote primjenom metoda statističke matematike.
- Izrađen je matematički model u koji je ugrađen novorazvijeni algoritam za brzo i pouzdano upravljanje budućim emisijama flote vozila temeljeno na njenim emisijskim parametrima, modeliranoj difuziji novih pogonskih sustava i dinamici obnavljanja flote.
- Definirani su novi postupci koji omogućuju jednostavno upravljanje emisijama flote primjenom emisijskih indikatora.
- Sintezom primijenjenih metoda i rješenja znatno je skraćeno vrijeme te je poboljšana procjena budućih emisija.

6.4. Mogući smjer nastavka rada

Provedeno istraživanje može se nastaviti izravnim uključivanjem vozila ostalih kategorija, prvenstveno M2 i M3 te kategorije N.

Također bi trebalo istražiti senzitivnost rezultata izračuna emisija programom COPERT 5 s obzirom na oscilacije u kvaliteti podataka o količinama goriva prodanih sektoru cestovnog transporta. Naime, sustav prikupljanja tih podataka još je jako daleko od preporuka *dobre*

prakse (good practice) navedenih u Smjernicama za nacionalne inventare emisija stakleničkih plinova, Međuvladinog panela za promjenu klime, iz 2006. godine, vol. 2, poglavlje 3.

Nadalje, izračun emisija temeljem goriva prodanog sektoru cestovnog transporta krije u sebi jednu vrlo važnu zamku. Ta goriva troše strani turisti koji dolaze u Hrvatsku, a isto tako i strani prijevoznici čiji cilj je Hrvatska ili kroz nju samo prolaze. S obzirom na omjer razvijenosti Hrvatske i ostalih europskih država, što se vrlo dobro vidi po našem pretposljednem mjestu na ljestvici BDP-a članica Unije, jasno je da je intenzitet transporta stranih vozila u Hrvatskoj nekoliko puta veći od intenziteta hrvatskih vozila u inozemstvu. U takvoj situaciji naša zemlja ne može biti odgovorna za povećanje emisija koje je posljedica stranog transporta u Hrvatskoj. Taj je problem jasno detektiran u razvijenim članicama Unije, npr. u Nizozemskoj i Njemačkoj, pa se tamo prate i analiziraju npr. statistički podaci o gorivu prodanom u zemlji i u inozemstvu kao i o udjelu inozemnih vozila u emisijama stakleničkih plinova.

Poboljšanjem uvida u ove nepoznanice znatno bi se unaprijedila točnost procjena emisija pa bi alati razvijeni tijekom izrade ove disertacije postali još učinkovitiji.

Također, upotpunjavanje ulaznih podataka (u narednim godinama) utjecat će s vremenom na korekcije u svim podmodelima, odnosno cjelovitom modelu, i dodatno potvrditi njegovu ispravnost.

Na kraju, treba imati na umu da je područje emisija stakleničkih plinova izvanredno dinamično. Najveći pritisak dolazi od sve prisutnijeg globalnog zagrijavanja kojem značajno doprinosi ubrzano povećavanje koncentracije ovih plinova u atmosferi, čemu cestovni transport značajno doprinosi. Pod tom prijetnjom svjetske organizacije donose preporuke i mjere kojima se emisije stakleničkih plinova nastoje smanjiti u svim područjima ljudskih djelatnosti. Zbog toga treba u predstojećem razdoblju očekivati daljnje postroženje normi koje reguliraju ovo područje, kao što je na primjer u Uvodu spomenuti prošlogodišnji prijedlog Uredbe Europskog parlamenta i Vijeća o utvrđivanju standardnih vrijednosti emisija CO₂ za nove osobne automobile.

Popis literature

- [1] Delphi, 'Delphi Worldwide emissions standards - passenger cars and light duty vehicles 2018-2019'.
- [2] S. Eggleston, J. Goodwin, W. Irving, J. Penman, and M. Woodfield, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 1: General Guidance and Reporting, Chapter 1: Introduction to the 2006 Guidelines. 2006.
- [3] R. van Basshuysen and F. Schäfer, Handbuch Verbrennungsmotor, Grundlagen • Komponenten • Systeme • Perspektiven, 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [4] 'Modelling tools for EU analysis'. [Online]. Dostupno: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/analysis/models_hr (pristup: 2017-08-17).
- [5] UNFCCC, 'Kyoto Protocol Introduction', UN Climate Change. [Online]. Dostupno: <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol> (pristup: 2018-07-10).
- [6] Europska komisija, 'Klimatski i energetske ciljevi za 2030. u pogledu konkurentnog, sigurnog i niskouglijasnog gospodarstva EU-a', European Commission, siječnja-2014. [Online]. Dostupno: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-54_hr.htm (pristup: 2017-08-15).
- [7] UNECE, 'World Forum for the harmonization of vehicle regulations (WP.29)', Vehicle Regulations - Transport - UNECE. [Online]. Dostupno: <https://www.unece.org/trans/main/welcwp29.html> (pristup: 2018-07-10).
- [8] S. Oberthür and C. Roche Kelly, 'EU Leadership in International Climate Policy: Achievements and Challenges', The International Spectator, vol. 43, no. 3, pp. 35–50, Sep. 2008.
- [9] Europsko vijeće, 'Klimatski i energetske okvir do 2030. - Consilium'. [Online]. Dostupno: <http://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/> (pristup: 2018-08-30).
- [10] M. Resetar, G. Pejic, and Z. Lulic, 'Road Transport Emissions of Passenger Cars in the Republic of Croatia', in Digital Proceedings of the 8th European Combustion Meeting, Dubrovnik, 2017, pp. 2553–2558.
- [11] S. Schmitz, 'Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland - Modellbildung, Simulation und kartographische Darstellung', in Proceedings, München, 1991, pp. 1–10.
- [12] D. Kreyenberg, Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität - Total Cost of Ownership, Energieeffizienz, CO₂-Emissionen und Kundennutzen. Springer Vieweg, 2016.
- [13] 'Energija - EUROPA | Europska unija'. [Online]. Dostupno: https://europa.eu/european-union/topics/energy_hr (pristup: 2018-11-29).
- [14] '2020–2030 CO₂ standards for new cars and light-commercial vehicles in the European Union', ICCT, November 2016, Nov. 2016.
- [15] 'Reducing CO₂ emissions from passenger cars | Klimatska politika'. [Online]. Dostupno: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_hr (pristup: 2018-11-29).
- [16] 'EU CO₂ emission standards for passenger cars and light-commercial vehicles', ICCT - International Council on Clean Transportation, Policy Update, 2014.
- [17] 'Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles | Klimatska politika'. [Online]. Dostupno: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_hr (pristup: 2018-08-26).
- [18] D. D. Savvidis, 'Heavy Duty Vehicles' CO₂ legislation in Europe and VECTO simulation tool', presented at the 8th Forum on Energy Efficiency in Transport: "Energy Efficiency Regulation for Heavy-Duty (HD) Vehicles", Mexico City, Mexico, 28-Sep-2015.
- [19] 'Energija', Europska unija. [Online]. Dostupno: https://europa.eu/european-union/topics/energy_hr. [Accessed: 29-Nov-2018].
- [20] 'Forecasting Approaches - Emissions Analysis Techniques - Transportation Control Measures - Research - Conformity - Air Quality - Environment - FHWA'. [Online]. Dostupno:

https://www.fhwa.dot.gov/Environment/air_quality/conformity/research/transportation_control_measures/emissions_analysis_techniques/forecasting_approaches.cfm (pristup: 2017-09-06).

- [21] H. Yue, 'Mesoscopic fuel consumption and emission modelling', Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering, State University, Blacksburg, Virginia, 2008.
- [22] G. Scora and M. Barth, Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM) - User's Guide 3.01. University of California, Riverside Center for Environmental Research and Technology, 2006.
- [23] A. Elkafoury, A. M. Negm, M. Bady, and M. H. F. Aly, 'Review of transport emission modeling and monitoring in urban areas - Challenge for developing countries', in ICALT 2014, Hammamet, Tunisia, 2014, pp. 23–28.
- [24] W. F. Faris, H. A. Rakha, R. I. Kafafy, M. Idres, and S. Elmoselhy, 'Vehicle fuel consumption and emission modelling: an in-depth literature review', International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, vol. 6, no. 3/4, p. 318, 2011.
- [25] R. Smit, L. Ntziachristos, and P. Boulter, 'Validation of road vehicle and traffic emission models - A review and meta-analysis', Atmospheric Environment, vol. 44, no. 25, pp. 2943–2953, 2010.
- [26] M. Barth, F. An, J. Norbeck, and M. Ross, 'Modal emissions modeling: a physical approach', Journal of the Transportation Research Board, no. Transportation Research Record 1520, pp. 81–88, 1996.
- [27] F. An, M. Barth, J. Norbeck, and M. Ross, 'Development of comprehensive modal emissions model. Operating under hot-stabilized conditions', Journal of the transportation research, no. Transportation research record 1587, Paper No. 970706, pp. 52–62, 1997.
- [28] H. Wang, L. Fu, Y. Zhou, and H. Li, 'Modelling of the fuel consumption for passenger cars regarding driving characteristics', Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 13, no. 7, pp. 479–482, Oct. 2008.
- [29] P. De Haan and M. Keller, 'Emission factors for passenger cars: Application of instantaneous emission modeling', Atmospheric Environment, vol. 34, pp. 4629–4638, 2000.
- [30] M. F. Weilenmann, P. Soltic, and S. Hausberger, 'The cold start emissions of light-duty-vehicle fleets: A simplified physics-based model for the estimation of CO₂ and pollutants', Science of The Total Environment, vol. 444, pp. 161–176, Feb. 2013.
- [31] F. Palmgren, R. Berkowicz, A. Ziv, and O. Hertel, 'Actual car fleet emissions estimated from urban air quality measurements and street pollution models', The Science of the Total Environment, vol. 235, no. 1–3, pp. 101–109, 1999.
- [32] V. Franco, M. Kousoulidou, M. Muntean, L. Ntziachristos, S. Hausberger, and P. Dilara, 'Road vehicle emission factors development: A review', Atmospheric Environment, vol. 70, no. February 2013, pp. 84–97, 2013.
- [33] G. Fontaras, V. Franco, P. Dilara, G. Martini, and U. Manfredi, 'Development and review of Euro 5 passenger car emission factors based on experimental results over various driving cycles', Science of the Total Environment, vol. 468–469, no. October 2013, pp. 1034–1042, 2014.
- [34] R. Joumard et al., 'Accuracy of exhaust emission factor measurements on chassis dynamometer', Journal of the Air and Waste Management Association, vol. 59, no. 6, pp. 695–703, 2009.
- [35] G. Zamboni, C. Carraro, and M. Capobianco, 'On-road instantaneous speed measurements on powered two-wheelers for exhaust emissions and fuel consumption evaluation', Energy, vol. 36, no. 2, pp. 1039–1047, Feb. 2011.
- [36] Z. Xiao, Z. Dui-Jia, and S. Jun-Min, 'A Synthesis of Methodologies and Practices for Developing Driving Cycles', Energy Procedia, vol. 16, pp. 1868–1873, Jan. 2012.
- [37] E. Ericsson, 'Independent driving pattern factors and their influence on fuel use and exhaust emission factors', Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 6, pp. 325–345, 2001.

- [38] L. M. Hilty, 'Umweltorientierte Verkehrsmodellierung und ihre Unterstützung durch ein objektorientiertes Modellbanksystem', in *Modellierung und Simulation im Umweltbereich*, R. Grützner, Ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1997, pp. 121–145.
- [39] L. Yu, S. Jia, and Q. Shi, 'Research on transportation-related emissions: Current status and future directions', *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 59, no. 2, pp. 183–195, 2009.
- [40] D. D. Parrish, 'Critical evaluation of US on-road vehicle emission inventories', *Atmospheric Environment*, vol. 40, no. 13, pp. 2288–2300, 2006.
- [41] J. B. Heywood, 'Assessing the fuel consumption and GHG of future in-use vehicles', in *ESD 2010 Proceedings*, 2010, pp. 1–12.
- [42] P. Mock, 'Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen', *Forschungsbericht 2010-26*, DLR, Universität Stuttgart, 2010.
- [43] S. Leinert, H. Daly, B. Hyde, and B. Ó Gallachóir, 'Co-benefits? Not always: Quantifying the negative effect of CO₂-reducing car taxation policy on NO_x emissions', *Energy Policy*, vol. 63, pp. 1151–1159, 2013.
- [44] T. Fontes and S. R. Pereira, 'Impact assessment of road fleet transitions on emissions: The case study of a medium European size country', *Energy Policy*, vol. 72, pp. 175–185, 2014.
- [45] I. Meyer, S. Kaniovski, and J. Scheffran, 'Scenarios for regional passenger car fleets and their CO₂ emissions', *Energy Policy*, vol. 41, pp. 66–74, 2012.
- [46] J. C. Palencia, González, T. Furubayashi, and T. Nakata, 'Energy use and CO₂-emissions reduction potential in passenger car fleet using zero emission vehicles and lightweight materials', *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 548–565, 2012.
- [47] G. O. Duarte, G. A. Gonçalves, and T. L. Farias, 'A Methodology to Estimate Real-world Vehicle Fuel Use and Emissions based on Certification Cycle Data', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 111, pp. 702–710, 2014.
- [48] L. Ntziachristos et al., 'In-use vs. type-approval fuel consumption of current passenger cars in Europe', *Energy Policy*, vol. 67, no. August, pp. 403–411, 2014.
- [49] 'Procjene stanovništva Republike Hrvatske u 2016.', *Državni zavod za statistiku RH*, Priopćenje 7.1.3., Sep. 2017.
- [50] 'Number of passenger cars per 1000 inhabitants in the EU 2016', *Eurostat*, Apr. 2018.
- [51] M. Rexeis, S. Hausberger, J. Kühlwein, and R. Luz, 'Update of Emission Factors for EURO 5 and EURO 6 vehicles for the HBEFA Version 3.2, Final Report', *TU Graz*, I-31/2013/ Rex EM-I 2011/20/679, Dec. 2013.
- [52] M. Keller, S. Hausberger, C. Matzer, and P. Wüthrich, 'HBEFA Version 3.3, Hintergrundbericht', *INFRAS*, Bern, Schweiz, Apr. 2017.
- [53] G. Fontaras, N. G. Zacharof, and B. Ciuffo, 'Fuel consumption and CO₂ emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions', *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 60, pp. 97–131, 2017.
- [54] 'A review of data and methods to calculate greenhouse gas emissions from alternative fuel transport', *Department of Energy and Climate Change, UK*, London, UK, 2014.
- [55] R. Kolke, 'Stellungnahme von Dr.-Ing. Reinhard Kolke'. 08-Sep-2016.
- [56] Vehicle emissions testing programme. *Department for Transport, UK*, 2016.
- [57] T. E. Lipman and M. A. Delucchi, 'Emissions of nitrous oxide and methane from conventional and alternative fuel motor vehicles', *Climatic Change*, vol. 53, pp. 477–516, 2002.
- [58] S. Hausberger, P. Sturm, M. Rexeis, R. Luz, and C. Kurz, 'Feinstaub und NO_x, Reduktionspotenziale im Straßenverkehr', presented at the *Symposium zur Feinstaubproblematik*, TU Graz, 28-Sep-2011.
- [59] 'Stickoxid-Belastung durch Diesel-Pkw noch höher als gedacht | Umweltbundesamt', 25-Apr-2017. [Online]. Dostupno: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/stickoxid-belastung-durch-diesel-pkw-noch-hoeher> (pristup: 2018-11-24).

- [60] V. Heijne, G. Kadijk, N. Ligterink, P. van der Mark, J. Spreen, and U. Stelwagen, 'NO_x emissions of fifteen Euro 6 diesel cars: Results of the Dutch LD road vehicle emission testing programme 2016', TNO 2016 R11177, Oct. 2016.
- [61] C. D. Waldron et al., 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy, Chapter 3: Mobile Combustion. 2006.
- [62] L. Ntziachristos and Z. Samaras, EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 – Last Update June 2017, 1.A.3.b.i-iv Road transport. 2017.
- [63] Energija u Hrvatskoj 2010., Godišnji pregled. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, 2011.
- [64] Energija u Hrvatskoj 2016., Godišnji pregled. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, 2017.
- [65] 'Vehicle emission models usage in Europe', ermes - European Research on Mobile Emission Sources. [Online]. Dostupno: https://www.ermes-group.eu/web/leading_eu_models (pristup: 2018-07-01).
- [66] Statistički ljetopis Republike Hrvatske 2017., Zagreb: Državni zavod za statistiku.
- [67] A.-N. Spiess and N. Neumeyer, 'An evaluation of R2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach', BMC Pharmacology, vol. 10, no. 1, p. 6, 2010.
- [68] 'Developments in fuel efficiency of an average car alongside trends in private car ownership and greenhouse gas (GHG) emissions — European Environment Agency', 29-Jun-2015. [Online]. Dostupno: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/developments-in-fuel-efficiency-of-1#tab-chart_1 (pristup: 2018-10-07).
- [69] A. Linden, J. L. Adams, and N. Roberts, 'Evaluating Disease Management Program Effectiveness: An Introduction to Time-Series Analysis', Disease Management, vol. 6, no. 4, pp. 243–255, Dec. 2003.
- [70] I. Šošić, Primijenjena statistika, 2. izdanje. Zagreb, 2006.
- [71] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel, Time Series Analysis, Forecasting and Control, 4th ed. Wiley, 2008.
- [72] C. Zaiontz, 'Performing Real Statistical Analysis Using Excel', Real Statistics Using Excel. [Online]. Dostupno: <http://www.real-statistics.com/> (pristup: 2018-08-15).
- [73] R. Hyndman and G. Athanasopoulos, 'Forecasting: Principles and Practice'. [Online]. Dostupno: <https://otexts.org/fpp2/> (pristup: 2018-08-13).
- [74] 'Interpret the key results for ARIMA - Minitab'. [Online]. Dostupno: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/time-series/how-to/arima/interpret-the-results/key-results/> (pristup: 2018-08-25).
- [75] 'Interpret the partial autocorrelation function (PACF) - Minitab'. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/time-series/how-to/partial-autocorrelation/interpret-the-results/partial-autocorrelation-function-pacf/> (pristup: 2018-08-25).
- [76] SPSS Trends 10.0, 1999, SPSS Inc., ISBN 013-017905-1.
- [77] J. Vogel, Prognose von Zeitreihen Eine Einführung für Wirtschaftswissenschaftler. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [78] J. S. Armstrong, Ed., 'Extrapolation for Time-Series and Cross-Sectional Data', in Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners, Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 217–243.
- [79] T. Pukšec, G. Krajačić, Z. Lulić, B. V. Mathiesen, and N. Duić, 'Forecasting long-term energy demand of Croatian transport sector', Energy, vol. 57, pp. 169–176, Aug. 2013.
- [80] N. Bacaër, A short history of mathematical population dynamics. London: Springer Verlag London Ltd, 2011.
- [81] J. C. Fisher and R. H. Pry, 'A simple substitution model of technological change', Technological Forecasting and Social Change, vol. 3, pp. 75–88, Jan. 1971.
- [82] E. M. Rogers, Diffusion of innovations, 3rd ed. New York : London: Free Press ; Collier Macmillan, 1983.

- [83] N. Meade and T. Islam, 'Technological Forecasting—Model Selection, Model Stability, and Combining Models', *Management Science*, vol. 44, no. 8, pp. 1015–1130, Aug. 1988.
- [84] H.-S. Oh, 'The selection of technological forecasting models in life analysis', Iowa State University, 1988.
- [85] S. Radas, 'Diffusion Models in Marketing: How to Incorporate the Effect of External Influence?', *Privredna kretanja i ekonomska politika*, vol. 105, pp. 31–51, 2005.
- [86] M. Sokele, 'Growth Models for the Forecasting of New Product Market Adoption', *Teletronikk*, vol. 3/4, pp. 144–154, 2008.
- [87] D. Kucharavy and R. De Guio, 'Application of S-shaped curves', *Procedia Engineering*, vol. 9, pp. 559–572, 2011.
- [88] J.-F. Mercure et al., 'The dynamics of technology diffusion and the impacts of climate policy instruments in the decarbonisation of the global electricity sector', *Energy Policy*, vol. 73, pp. 686–700, Oct. 2014.
- [89] K. N. Saad, A. D. Little, P. A. Roussel, and C. Tiby, *Management der FetE-Strategie*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1993.
- [90] J. S. Armstrong, Ed., *Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [91] P. Goos and S. Hagenhoff, 'Strategisches Innovationsmanagement: Eine Bestandsaufnahme', Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Wirtschaftsinformatik, Göttingen, 11/2003, 2003.
- [92] C. M. Christensen, 'Exploring the Limits of the Technology S-curve. Part I: Component Technologies', *Production and Operations Management*, vol. 1, no. 4, pp. 334–357, 1992.
- [93] D. J. Packey, 'Market Penetration of New Energy Technologies', Argonne National Laboratory, NREL/TP-462-4860, Feb. 1993.
- [94] A. Sood, G. M. James, and G. J. Tellis, 'Functional Regression: A New Model for Predicting Market Penetration of New Products', *Marketing Science*, vol. 28, no. 1, pp. 36–51, Jan. 2009.
- [95] M. Rešetar, G. Pejić, and Z. Lulić, 'Changes and trends in the Croatian road vehicle fleet – Need for change of policy measures', *Transport Policy*, vol. 71, pp. 92–105, Nov. 2018.
- [96] 'Global Warming Potential Values'. Greenhouse Gas Protocol, 16-Feb-2016.
- [97] M. Mahmoud, R. Garnett, M. Ferguson, and P. Kanaroglou, 'Electric buses: A review of alternative powertrains', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 673–684, Sep. 2016.
- [98] T. Earl, L. Mathieu, S. Cornelis, S. Kenny, C. C. Ambel, and J. Nix, 'Analysis of long haul battery electric trucks in EU', presented at the 8th Commercial Vehicle Workshop, Graz, Austria, 2018, p. 22.
- [99] C. Frey, J. Penman, L. Hanle, S. Monni, and S. Ogle, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 1: General Guidance and Reporting, Chapter 3: Uncertainties. 2006.
- [100] C. Kouridis, D. Gkatzoflias, I. Kioutsioukis, L. Ntziachristos, C. Pastorello, and P. Dilara, *Uncertainty Estimates and Guidance for Road Transport Emission Calculations*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
- [101] J. Klein, J. Hulskotte, N. Ligterink, S. Dellaert, H. Molnár, and G. Geilenkirchen, 'Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands 2017', Statistics Netherlands, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, TNO, RWS Centre for Transport and Navigation (WVL), May 2017.
- [102] J. Miller, 'Reducing CO₂ emissions from road transport in the European Union: An evaluation of policy options', ICCT, Working paper 2016–10, 2016.
- [103] M. Moser, 'War and Peace - Our World in Data'. [Online]. Dostupno: <https://ourworldindata.org/war-and-peace> (pristup: 2018-09-04).
- [104] 'Historical Oil Prices: InflationData.com'. [Online]. Dostupno: https://inflationdata.com/Inflation/Inflation_Rate/Historical_Oil_Prices_Table.asp (pristup: 2018-09-04).

- [105] I. Švedek, 'Izvješće o inventaru stakleničkih plinova na području Republike Hrvatske za razdoblje 1990.-2016. (NIR 2018)', Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, Zagreb, May 2018.
- [106] Energija u Hrvatskoj 2014, Godišnji pregled. Ministarstvo gospodarstva, 2015.
- [107] I. Švedek, 'National Inventory Report 2009. Croatian greenhouse gas inventory for the period 1990-2007', Ministry of Environmental Protection, Physical Planning and Construction, Zagreb, May 2009.
- [108] 'EEA greenhouse gas - data viewer — European Environment Agency'. [Online]. Dostupno: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer> (pristup: 2018-10-08).
- [109] N. Jackson, 'Future Automotive Challenges & Opportunities', presented at the Ricardo Plc, 22-Nov-2017. <http://peter-ftp.co.uk/aviation/misc-euroga/2017-Future%20Automotive%20Challenges%20Issued.pdf> (pristup: 2018-10-22).
- [110] 'Electric Vehicle Outlook 2018', Bloomberg New Energy Finance, 2018.
- [111] M. Amberg, F. Bodendorf, and K. Möslin, Wertschöpfungsorientierte Wirtschaftsinformatik. Berlin: Springer, 2011.
- [112] 'Strategija prometnog razvoja Republike Hrvatske (2017. - 2030.)'. Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture, 2017.
- [113] ERTRAC, EPoSS, and ETIP SNET, 'European Roadmap Electrification of Road Transport', ERTRAC - European Road Transport Research Advisory Council, Jun. 2017.
- [114] 'Interactive map: Electric vehicle incentives per country in Europe | ACEA - European Automobile Manufacturers' Association'. [Online]. Dostupno: <https://www.acea.be/statistics/article/interactive-map-electric-vehicle-incentives-per-country-in-europe-2018>. [Accessed: 22-Nov-2018].
- [115] P. Plötz, T. Gnann, M. Wietschel, and S. Ullrich, 'How to foster electric vehicle market penetration? – A model based assessment of policy measures and external factors', in ECEEE Summer Study Proceedings, 2015, pp. 843–853.
- [116] K. Y. Bjerkan, T. E. Nørbech, and M. E. Nordtømme, 'Incentives for promoting Battery Electric Vehicle (BEV) adoption in Norway', Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 43, pp. 169–180, Mar. 2016.
- [117] D. A. Hanson, Y. Kryukov, S. Leyffer, and T. S. Munson, 'Optimal Control Model of Technology Penetration', Argonne National Laboratory, Sep. 2008.

KRATKI ŽIVOTOPIS

Rođen sam 22. ožujka 1967. godine u G. Komušini, općina Teslić, R. BiH, gdje sam završio osnovnu i srednju strojarску tehničku školu. Na Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu upisao sam se 1987. godine a diplomirao sam u jesen 1991. godine.

Za postignute rezultate tijekom studiranja nagrađen sam medaljom dekana. Školske 1991./1992. godine upisao sam poslijediplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, smjer strojarске konstrukcije, usmjerenje motori. Magistarski rad pod nazivom *Prilog analizi mehanizama transportnih naprava*, uspješno sam obranio u travnju 1995. godine.

Odmah po završetku studija 01. siječnja 1992. godine, zaposlio sam se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, kao znanstveni novak, gdje sam radio do 1995. godine. U ovom sam razdoblju sudjelovao u znanstveno istraživačkom radu u okviru više projekata pri Katedri za motore, vozila i transport u industriji. Također sam sudjelovao u nastavi iz kolegija Prenosila i dizala (konstrukcijske vježbe i konzultacije) pri istoj katedri na FSB-u Zagreb.

U Centru za vozila Hrvatske zaposlio sam se 1995. godine na radnom mjestu stručnog suradnika za tehničke preglede vozila. U istoj tvrtki zaposlen sam i danas, kao Pomoćnik uprave za tehničke poslove.

Tijekom svog rada u Centru za vozila Hrvatske sudjelovao sam u pripremi i provedbi niza projekata, kao što su: Uvođenje ispitivanja ispušnih plinova (EKO TEST) motornih vozila, Modernizacija uređaja i opreme u STP, Razvoj novih tehnologija ispitivanja nadograđenih, pregrađenih ili samoizgrađenih vozila, Digitalizacija procesa tehničkih pregleda i registracije vozila i slično.

Sudjelovao sam u radu niza radnih skupina prilikom donošenja različitih tehničkih propisa vezanih za cestovna vozila u RH, kao što su: Pravilnik o tehničkim uvjetima vozila na cestama, Pravilnik o tehničkim pregledima vozila, Pravilnik o ispitivanju vozila i slično.

Aktivni sam član radne skupine za Ispitivanje ispušnih plinova motornih vozila CITA-e (međunarodna udruga tvrtki i institucija koje se bave tehničkim pregledima i ispitivanjem vozila).

Služim se njemačkim i engleskim jezikom.

Goran Pejić

RÉSUMÉ

I was born on March 22, 1967 in G. Komušina, the Municipality of Teslić, Bosnia and Herzegovina, where I finished primary school and technical school of mechanical engineering. I enrolled in the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb in 1987 and graduated in the autumn of 1991.

During my studies, I was awarded the Dean's Medal for academic excellence. In the academic year 1991/1992, I enrolled on a postgraduate study programme in mechanical engineering structures, specializing in engines, at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. In April 1995 I successfully defended my Master's thesis titled *A Contribution to the Analysis of the Transport Device Mechanisms*.

After completing my studies on January 1, 1992, I was employed by the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb where I worked as a junior research assistant until 1995. During that period, I participated in scientific research conducted as part of several projects at the Department of Engines, Vehicles and Transport in Industry. I also took part in the course of lectures entitled Hoisting Equipment (structural design demonstrations and consultations) at the same Department of the Faculty in Zagreb.

I have been working for the Centre for Vehicles of Croatia since 1995 when I was employed there as a professional associate for technical inspections of vehicles. Now, I hold the position of Technical Adviser to the Board.

During my employment at the Centre for Vehicles of Croatia I have participated in the preparation and implementation of a number of projects, including the projects aimed at introducing motor vehicle exhaust emission testing (ECO TEST), modernizing the devices and equipment in technical inspection stations, developing new technologies for the testing of modified, converted or custom-built vehicles, digitizing technical inspection and vehicle registration procedure, etc.

I have been a member of a number of working groups involved in the adoption of various technical regulations related to road vehicles in the Republic of Croatia, such as the Ordinance on Technical Requirements for Road Vehicles, the Ordinance on Technical Inspection of Vehicles, the Ordinance on Vehicle Testing, etc.

I am an active member of the CITA Working Group for motor vehicle exhaust emission testing (an international association of companies and institutions conducting technical inspections and vehicle testing).

I am fluent in German and English.

Goran Pejić