

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Vladimir D. Đorić

**ISTRAŽIVANJE I MODELIRANJE  
EMISIJA VOZILA U FUNKCIJI  
MODELIRANJA SAOBRAĆAJNIH  
TOKOVA NA ULIČNOJ MREŽI**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC  
ENGINEERING

Vladimir D. Djoric

**VEHICLE EMISSION SURVEY AND  
MODELING IN THE CONTEXT OF  
STREET NETWORK TRAFFIC FLOW  
MODELING**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

**Mentor:** Redovni profesor dr **Jadranka JOVIĆ**,  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

**Članovi komisije:** Redovni profesor dr **Smiljan VUKANOVIĆ**,  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Naučni savetnik dr **Dragana ĐORĐEVIĆ**  
Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju - Centar za hemiju

Redovni profesor dr **Dejan FILIPOVIĆ**  
Univerzitet u Beogradu - Geografski fakultet

**Datum  
odbrane:**

## **ISTRAŽIVANJE I MODELIRANJE EMISIJA VOZILA U FUNKCIJI MODELIRANJA SAOBRAĆAJNIH TOKOVA NA ULIČNOJ MREŽI**

### **Rezime:**

Upotreba transportnih modela za procene emisija predstavlja važan deo procesa održivog planiranja saobraćaja većih urbanih područja. Procena uticaja saobraćajnih rešenja na životnu sredinu je jedna od tri osnovne komponente održivosti. Prethodna praksa u proceni emisija saobraćajnog toka u Srbiji podrazumevala je upotrebu emisionih modela razvijenih za druga područja (gradove ili države) što omogućava samo relativno poređenje varijanti rešenja. Razvijeni metodološki pristup prikupljanja i modeliranja je dobra osnova za formiranje modela specifičnog za lokalne uslove koji bi omogućio i apsolutnu kvantifikaciju emisije.

Formiranjem konceptualnog modela odnosno metodologije formiranja modela, koji kao ulaz koristi samo podatke o načinu vožnje u svakoj sekundi, za konkretan slučaj matematički je opisana veza emisionog sa mikro simulacionim transportnim modelom. Za primenu u makro i mezoskopskim modelima potrebno je generisati emisione faktore na nivou prosečnih brzina. Baza podataka na nivou svake sekunde je dobra osnova za generisanje emisionih faktora jer omogućava simuliranje bilo kog ciklusa vožnje. A generisanje emisionih faktora je zasnovano na ciklusima vožnje koji predstavljaju karakteristično ponašanje vozača u određenim saobraćajnim okolnostima.

Upotreba podataka o emisijama vozila na nivou sekunde je bila ograničena na istraživačku zajednicu zbog visoke cene uređaja za merenje. Formiranjem merne instalacije u ovoj disertaciji potvrđena je mogućnost formiranja ekonomične merne metodologije koja će omogućiti formiranje baze podataka o emisijama vozila u realnim uslovima u saobraćajnom toku kao osnova za precizno određivanje emisija vozila u saobraćajnom toku u urbanim područjima. Na taj način se omogućava pristup podacima širem krugu zainteresovanih strana i brži napredak u oblasti istraživanja.

Pri formiranju merne instalacije, osnovni problem je bio rešavanje problema kvantifikovanja ukupne količine zagađujućih materija. Problem se svodi na mogućnost transformisanja jedinica u kojima se uobičajeno meri emisija (ppm ili mg/m<sup>3</sup>) u apsolutnu količinu emitovanog gasa (mg/s). Problem je uspešno rešen upotrebom Pitove cevi za merenje brzine gasa koja predstavlja sastavni deo merne instalacije.

Rad je u osnovi multi-disciplinaran. Ističe se ideja upotrebe teorije kontrole sistema u obradi baze podataka o emisijama. Na taj način se daje značajan prilog širenju mogućnosti u obradi prikupljenih podataka za formiranje modela i mogućnostima budućih istraživanja koja se tiču varijabilnosti i pouzdanosti podataka.

<b>Ključne reči:</b>	Transportni modeli, Režimski emisioni modeli, Trenutne emisije vozila, Karakteristike vožnje u svakoj sekundi
<b>Naučna oblast:</b>	Saobraćaj i transport
<b>Uža naučna oblast:</b>	Planiranje saobraćaja i saobraćajne infrastrukture
<b>UDK broj:</b>	656.01(043.3)

## **VEHICLE EMISSION SURVEY AND MODELING IN THE CONTEXT OF STREET NETWORK TRAFFIC FLOW MODELING**

### **Abstract:**

The use of transport models in traffic flow emission estimation is an important part of sustainable transport planning in major urban areas. Impact assessment of the traffic solutions to the environment is one of the three basic components of sustainability. Previous experience in the emission estimations in Serbia show the use of emission models developed for other areas (cities or countries) which allow only relative comparison of variant solutions. Methodological approach of data collection and modelling developed in this Dissertation is a good basis for development of locally specific model that would allow the absolute quantification of emissions.

The development of the conceptual model and the modelling methodology, which uses second-by-second driving pattern data as an only input, is mathematically described in connection with micro-simulation transport model. Emission factors based on average speed need to be generated for the use in macro and mesoscopic models. Database on a second-by-second basis enables estimation of emission factors for any driving cycle. Driving cycles represent typical human behaviour in certain traffic conditions.

The use of second-by-second vehicle emission data was limited to the research community because of the high cost of measuring equipment. Measuring installations built in this thesis confirmed the possibility of creating cost-effective measurement methodology. Methodology will allow the establishment of a vehicle emissions database for real traffic conditions as a basis for accurate vehicle emission estimation in the traffic flows in urban areas. It provides data for a wider range of stakeholders and the advance in this field of research.

The main problem was establishing the total amount of emissions. The problem boils down to the possibility of unit's conversion: turning ppm or mg/m<sup>3</sup>, usually used in emissions measurements, to absolute amount of gas emitted (mg/s). The

problem has been successfully resolved using Pitot's tube to measure gas velocity, which is an integral part of the measuring installation.

The work is essentially multi-disciplinary. The idea of using the system control theory in the processing of the emission data is emphasized. The approach contributes to expanding possibilities in emission data processing for modelling purposes. The possibilities for future research related to the variability and reliability of the data are also expanded.

<b>Keywords:</b>	Transport Models, Modal Emission Models, Instantaneous Vehicle Emissions, Second-by-Second Driving Pattern
<b>Scientific Field:</b>	Traffic and Transport
<b>Field of Academic Expertise:</b>	Transport and Infrastructure Planning
<b>UDC:</b>	656.01(043.3)

# SADRŽAJ

1	Uvod.....	1
2	Modeliranje saobraćajnih tokova u funkciji planiranja saobraćaja.....	7
2.1	Transportni modeli kao simulacioni alati .....	7
2.2	Kontekst održivosti .....	15
2.3	Pristupi u modeliranju saobraćaja i emisija .....	25
2.4	Modeliranje u okviru različitih saobraćajnih podsystema (multi-modalno modeliranje).....	31
2.5	Upotrebna vrednost modelskog pristupa .....	41
3	Pregled literature .....	46
3.1	Uticaojni faktori na emisiju vozila .....	48
3.1.1	Uticaojni uslova u saobraćanom toku na emisije .....	49
3.1.2	Uticaojni različitih uslovima rada vozila na emisije.....	51
3.1.3	Uticaojni eksploatacionih faktora na emisije vozila.....	52
3.1.4	Uticaojni tehničkih karakteristike vozila na emisije .....	53
3.2	Tipovi merenja kao osnova za emisione modele.....	55
3.2.1	Laboratorijska i dinamometarska merenja.....	56
3.2.2	Merenja na vozilu u pokretu (On board).....	56
3.2.3	Merenja emisija na saobraćajnici.....	57
3.3	Tipovi emisionih modela .....	59
3.3.1	Modeli emisionih faktora .....	59
3.3.2	Modeli prosečne brzine .....	60
3.3.3	Režimski (modalni) modeli .....	65
3.3.4	Modeli zasnovani na merenjima emisija na vozilu u svakoj sekundi..	74



4	Izbor emisionog modela .....	76
4.1	Neprikladni modeli bazirani na brzini i ubrzanju .....	79
4.2	Neprikladni modeli bazirani na snazi .....	81
4.3	Prilagodeni modeli .....	87
4.4	Zaključak izbora emisionog modela .....	90
5	Istraživanja emisija vozila.....	97
5.1	Metodologija istraživanja .....	97
5.1.1	Prostorni i vremenski obuhvat i uzorak.....	99
5.1.2	Metod.....	101
5.1.3	Merna instalacija .....	104
5.1.4	Baza podataka.....	109
5.1.5	Kalibracija i validacija baze prikupljenih podataka .....	112
5.2	Rezultati istraživanja.....	123
5.2.1	Emisije u zavisnosti od brzine i potrebne snage .....	128
6	Režimski model emisija .....	135
6.1	Definisanje modela.....	145
6.2	Kalibracija modela.....	156
6.3	Validacija modela.....	163
7	Izbor korekcionog faktora režimskog modela .....	166
7.1	Emisije u zavisnosti od temperature izduvnog gasa.....	172
8	Zaključak i pravci budućeg istraživanja .....	175
8.1	Zaključak .....	175
8.2	Pravci budućih istraživanja.....	180
9	Literatura.....	182
10	Prilog.....	194

## Spisak tabela

Tabela 2-1. Uticaj saobraćaja na održivost .....	18
Tabela 2-2. Indikatori održivosti .....	19
Tabela 5-1. Gasovi i opsezi merenja za Vario+ u zavisnosti od principa merenja.	104
Tabela 5-2. Računske veličine i jedinice uređaja Vario+ .....	105
Tabela 5-3. Sadržaj baze podataka o režimskim emisijama vozila .....	112
Tabela 5-4. Koeficijenti funkcija prenosa .....	117
Tabela 6-1. Raspodela potrebnih snaga u režimima aktivnosti vozila .....	142
Tabela 6-2. Raspodela ubrzanja u režimima aktivnosti vozila.....	143
Tabela 6-3. Koeficijenti režimskog modela za CO .....	149
Tabela 6-4. Statistički pokazatelji poklapanja modela sa emisijama CO.....	150
Tabela 6-5. Koeficijenti režimskog modela za NO <sub>x</sub> .....	152
Tabela 6-6. Statistički pokazatelji poklapanja modela sa emisijama NO <sub>x</sub> .....	153
Tabela 6-7. Koeficijenti režimskog modela za CH <sub>4</sub> .....	155
Tabela 6-8. Statistički pokazatelji poklapanja modela sa emisijama CH <sub>4</sub> .....	156
Tabela 6-9. Koeficijenti kalibrisanog režimskog modela za CO .....	162
Tabela 6-10. Statistički pokazatelji poklapanja kalibrisanog modela sa emisijama CO .....	162
Tabela 7-1. Šema rasutih dijagrama prikazanih u prilogu.....	173
Tabela 10-1. Rasponi klasa specifičnih snaga (VSP – Vehicle specific power) .....	209

## Spisak grafičkih priloga i slika

Slika 2-1. Istorijat razvoja transportnih modela.....	12
Slika 2-2. Nivoi transportnih modela (Barceló et al. 2005).....	26
Slika 2-3. Razlike u prezentaciji rezultata: makro, mezo i mikro nivo.....	27
Slika 2-4. Izbor metode raspodele saobraćaja u zavisnosti od zagušenja i broja alternativnih trasa.....	33
Slika 3-1. Dijagram brzina/vreme putovanja (Frey et al. 2001b).....	57
Slika 3-2. CO emisija vozila u odnosu na vreme putovanja (Frey et al. 2001b).....	57
Slika 3-3. Primer odnosa u režimskom modelu (Ahn et al. 2002).....	68
Slika 4-1. Primer rekonstrukcije signala emisije usled kašnjenja (Ajtay et al. 2005).....	88
Slika 5-1. Trasa istraživanja – primer jedne vožnje .....	100
Slika 5-2. Merna instalacija u vozilu .....	106
Slika 5-3. Pitova cev i sonda (pogled iz i van vozila).....	107
Slika 5-4. Primer snimljenih trenutnih emisija (Frey et al. 2002) .....	110
Slika 5-5. Temperatura izlaznog gasa za celu bazu podataka.....	110
Slika 5-6. Promena snimljene emisije u odnosu na promenu brzine .....	113
Slika 5-7. Blok dijagram vremena kašnjenja u sistemu prenosa gasa.....	113
Slika 5-8. Blok dijagram uređaja za merenje emisije.....	114
Slika 5-9. Statičko snimanje odziva uređaja – porast emisije CO.....	114
Slika 5-10. Statičko snimanje odziva uređaja – pad emisije CO.....	115
Slika 5-11. Statičko snimanje odziva uređaja – porast i pad emisije NO <sub>x</sub> .....	115
Slika 5-12. Statičko snimanje odziva uređaja – porast i pad emisije CH <sub>4</sub> .....	116
Slika 5-13. Prikaz MATLAB aplikacije za identifikaciju odziva sistema .....	116

Slika 5-14. Blok dijagram kola za simuliranje inverzne prenosne funkcije .....	118
Slika 5-15. Modifikacija izlaznog signala (Simulink) .....	119
Slika 5-16. Promene vrednosti emisija nakon korekcije .....	120
Slika 5-17. Raspored podataka po režimima .....	125
Slika 5-18. Snimljeni podaci – izvorna forma .....	126
Slika 5-19. Razlike u karakteristikama emisije u odnosu na kategoriju saobraćajnice.....	127
Slika 5-20. Grafički prikaz podataka u kml fajlu .....	127
Slika 5-21. Srednje emisije CO pri ubrzanju prikazane u 3D prostoru .....	128
Slika 5-22. Srednje emisije CO pri usporenju prikazane u 3D prostoru.....	129
Slika 5-23. Srednje emisije i standardna odstupanja CO pri ravnomernoj vožnji .	129
Slika 5-24. Srednje emisije NO <sub>x</sub> pri ubrzanju prikazane u 3D prostoru .....	130
Slika 5-25. Srednje emisije NO <sub>x</sub> pri usporenju prikazane u 3D prostoru .....	130
Slika 5-26. Srednje emisije i standardna odstupanja NO <sub>x</sub> pri ravnomernoj vožnji	131
Slika 5-27. Srednje emisije CH <sub>4</sub> pri ubrzanju prikazane u 3D prostoru .....	132
Slika 5-28. Srednje emisije CH <sub>4</sub> pri usporenju prikazane u 3D prostoru .....	132
Slika 5-29. Srednje emisije i standardna odstupanja NO <sub>x</sub> pri ravnomernoj vožnji	133
Slika 5-30. Uporedni prikaz emisija u zavisnosti od potrebne snage za fiksne brzine .....	134
Slika 6-1. Primer makroskopske relacije između prosečne brzine i emisije HC na koridoru (Frey et al. 2001a) .....	136
Slika 6-2. Primer srednjih režimskih emisija za osnovne zagađivače (Frey et al. 2002) .....	137
Slika 6-3. Režimske emisije osnovnih zagađivača, ukupne emisije.....	138
Slika 6-4. Režimske emisije osnovnih zagađivača, prosečne emisije .....	138
Slika 6-5. Režimske emisije CO, NO <sub>x</sub> i CH <sub>4</sub> (respektabilno) po klasama brzina .....	139

Slika 6-6. Primer emisione mape (brzina(redovi)/ubrzanje(kolone)/emisija).....	141
Slika 6-7. Raspodela frekvencija potrebnih snaga .....	146
Slika 6-8. Kriva zavisnosti brzine i emisije CO u uslovima ravnomerne vožnje.....	147
Slika 6-9. 3D model emisije CO za režim ubrzanja.....	148
Slika 6-10. 3D model emisije CO za režim usporenja.....	149
Slika 6-11. Kriva zavisnosti brzine i emisije NO <sub>x</sub> u uslovima ravnomerne vožnje	150
Slika 6-12. 3D model emisije NO <sub>x</sub> za režim ubrzanja.....	151
Slika 6-13. 3D model emisije NO <sub>x</sub> za režim usporenja .....	152
Slika 6-14. Kriva zavisnosti brzine i emisije CH <sub>4</sub> u uslovima ravnomerne vožnje	153
Slika 6-15. 3D model emisije CH <sub>4</sub> za režim ubrzanja .....	154
Slika 6-16. 3D model emisije CH <sub>4</sub> za režim usporenja.....	155
Slika 6-17. Kriva zavisnosti brzine i emisije CO u uslovima ravnomerne vožnje (polinom četvrtog stepena) .....	157
Slika 6-18. Model emisije CO za brzine ispod 5 km/h i vožnju pri ubrzanju.....	157
Slika 6-19. Model emisije CO za brzine ispod 5 km/h i vožnju pri usporenju .....	158
Slika 6-20. Model emisije CO za brzine od 5 do 30 km/h i vožnju pri ubrzanju ....	159
Slika 6-21. Model emisije CO za brzine od 5 do 30 km/h i vožnju pri usporenju..	159
Slika 6-22. Model emisije CO za brzine od 30 do 50 km/h i vožnju pri ubrzanju..	160
Slika 6-23. Model emisije CO za brzine od 30 do 50 km/h i vožnju pri usporenju	160
Slika 6-24. Model emisije CO za brzine od 50 do 90 km/h i vožnju pri ubrzanju..	161
Slika 6-25. Model emisije CO za brzine od 50 do 90 km/h i vožnju pri usporenju	161
Slika 7-1. Rasuti dijagram međusobne zavisnost svih snimljenih podataka .....	170
Slika 7-2. Detalj – Rasuti dijagram za O <sub>2</sub> , temperaturu gasa (TGAS), CO, NO <sub>x</sub> , CH <sub>4</sub> i brzinu gasa (Vgas) .....	171

Slika 7-3. Detalj – Rasuti dijagram zavisnosti temperature gasa (TGAS), CO, NO <sub>x</sub> i CH <sub>4</sub> u stanju mirovanja.....	171
Slika 10-1. Poređenje emisije CO i odnosa ekvivalencije (Source: Frey et al., 2001). .....	195
Slika 10-2. Prosečne emisije po godinama u zavisnosti od specifične snage (Bishop & Stedman 2008) .....	197
Slika 10-3. Početni ekran R softvera.....	206
Slika 10-4. Adresa baze podataka u R softveru.....	207
Slika 10-5. Učitavanje i imenovanje baze podataka u R softveru.....	207
Slika 10-6. Primer rasutog dijagrama za više kolona podataka.....	208
Slika 10-7. Prosečne režimske emisije za 14 klasa za osnovne zagađivače (CO <sub>2</sub> , CO, HC i NO <sub>x</sub> ) na osnovu podataka za modeliranje.....	209

## **1 Uvod**

Tokom proteklih decenija, transportni zahtevi u drumskom saobraćaju su globalno u drastičnom porastu i pored toga projektovan je dalji porast transportnih potreba (EC 2011). Najveća saobraćajna opterećenja su karakteristična za gradske deonice odnosno uličnu mrežu. U Srbiji su deonice putne mreže najopterećenije u blizini većih gradskih naselja što ukazuju na dominaciju kraćih prigradsko-gradskih kretanja u odnosu na daljinska kretanja (Jovic & Djoric 2009). Zabeležen je izuzetno visok nivo i rast opterećenja gradskih deonica. (Jovic & Djoric 2010)

Transportni sektor se smatra glavnim opterećujućim faktorom na kvalitet životne sredine. Drumski saobraćaj je dominantan antropogeni izvor zagađenja vazduha u urbanim sredinama (Fenger 1999) kroz emisije CO, NO<sub>x</sub> i isparljivih organskih jedinjenja (Djordjevic & Solevic 2008) kao i CO<sub>2</sub> koji je značajan na globalnom nivou. Značaj ovog oblika zagađenja nije samo u veličini emisije, već i zbog toga što se zagađenja emituju u neposrednoj blizini ljudi. Disperzija zagađivača u atmosferi zavisi od izvora emisije, meteoroloških uslova i fizičko-hemijskih karakteristika zagađivača (Djordjevic & Solevic 2008).

Ne samo da je intenzitet saobraćajnih tokova na putnim i uličnim deonicama u stalnom porastu, već su i saobraćajna zagušenja sve učestalija i veća, posebno u većim gradovima. Precizne analize na uličnim mrežama gradova pokazale su da posle saobraćajne aktivnosti (pređeni kilometri po vozilu), zagušenja u saobraćajnom toku najviše doprinosi povećanju ukupne emisije CO i HC (Smith et al. 2011).

Najveći naponi da se zagađenje vazduha smanji i da se poboljša kvalitet vazduha u urbanim sredinama, učinjeni su u proteklih nekoliko decenija. Procenjuje se da je, širom sveta, skoro milijardu ljudi u urbanim sredinama kontinuirano izloženo opasnosti po zdravlje od zagađenog vazduha (Ahrens 2003).

Principi održivog transporta pred savremeno planiranje saobraćaja postavljaju više ciljeva od kojih je najopštiji sistemski pristup u inženjerstvu i analizu svih pozitivnih i negativnih efekata planiranih mera iz oblasti ekonomije, društva i ekologije. Odustaje se od konvencionalnih planerskih principa koji se odnose na

sušto rešavanje konkretnog problema, težeći ka rešenjima čiji su efekti u svim aspektima najbolji mogući (Jovic & Djoric 2010). Procena uticaja na životnu sredinu (buku i zagađenje vazduha tj. emisije) postaju sastavni deo svih saobraćajnih analiza. Prvi korak je kvantifikovanje emisija koje nastaju kao posledica saobraćaja. Procena uticaja saobraćaja na životnu sredinu bazirana je na upotrebi emisionih modela koji predstavljaju nadogradnju transportnih modela koji su široko zastupljeni u planiranju i upravljanju transportnim sistemom.

Za velike sisteme, kao što je transportni sistem, modeliranje je metod koji zamenjuje primenu saobraćajnih rešenja bez prethodne provere očekivanih efekata. Model koji dobro oponaša sistem može se koristiti da bi se testirale i kvantifikovale reakcije sistema na primenu planerskih ili upravljačkih mera. Upotreba određenog modela zavisiće od raspoložive ulazne baze podataka (I-C matrica), svrhe ispitivanja saobraćajne mreže kao i poznavanja karakteristika mreže i ponašanja putnika (Vukanović 1997). Modeli se koriste i za prognozu ponašanja sistema i omogućavaju da se naučna dostignuća iz oblasti istraživanja primene i tako postaju primenjena nauka (Jovic & Djoric 2010). Transportni model grada (regiona, države) je sveobuhvatni informacioni sistem koji sadrži skup referentnih podataka, indikatora i parametara saobraćajnog sistema i korišćenja zemljišta (namenu površina), koji zajedno sa odgovarajućim softverskim paketom formiraju skup saobraćajnih podmodela kojima je moguće simulirati, testirati i vrednovati različite strategije i/ili scenarija upravljanja saobraćajnom potražnjom (Ortuzar & Willumsen 2011).

Porast zagađenja vazduha uslovio je razvoj emisionih modela i uopšte korišćenje geoprostornog modeliranja (Filipović 2000). Cilj modeliranja emisija je procene uticaja različitih izvora zagađenja. Emisioni modeli mogu biti nezavisni ili u sastavu transportnih modela. Emisioni modeli se koriste za procenu emisije aerozagađenja od saobraćaja radi predviđanja i upravljanja nivoom zagađenja vazduha u blizini saobraćajnica (Smit et al. 2008). U zavisnosti od prostorne obuhvatnosti područja procene emisija mogu imati manji ili veći stepen preciznosti. Najopštiji modeli svode zavisnost emisije na samo jedan uticajni faktor (kao što je prosečna brzina) i koriste se na nivou regiona ili čitavih država. Rezultat ovakvog pristupa je ukupna



emisija zagađivača na području od interesa na osnovu prosečnih vrednosti za celokupni vozni park. Na stepen preciznosti uticao je tehnološki napredak opreme i računara, pa se sa vremenom povećava broj uticajnih faktora koji se uključuje u analizu.

Istraživanja čiji je cilj definisanje baza podataka kao osnove za razvoj modela mogu biti obavljena u realnim uslovima saobraćajnog toka kao i u laboratorijskim uslovima.

#### *Predmet i naučni cilj rada*

Emisije vozila su veoma zavisne od trenutnih promena brzina i ubrzanja (NRC 2000). Termin „makroskopski nivo“ u proceni emisija se odnosi na urbani, regionalni ili nacionalni nivo obuhvata i zasniva se na agregiranim podacima za celo područje. Mezoskopski nivo je upućen na manje prostorne jedinice, kao što je neki urbani koridor. Mikroskopski nivo se odnosi na trenutne emisije na specifičnim lokacijama, kao što je raskrsnica ili deonica saobraćajnice. U zavisnosti od nivoa procene emisija koriste se i različiti tipovi modela koji će biti predmet istraživanja u disertaciji.

Cilj ove disertacije je razvijanje pristupa za prikupljanje podataka na nivou svake sekunde (mikro nivo ili trenutne emisije) koji služe za formiranje modela za procenu emisija vozila u saobraćajnom toku. Formiranje baze podataka o trenutnim emisijama je podrška dugoročnog razvoja metoda za procenu emisija vozila u saobraćajnom toku odnosno u transportnim modelima na nivou voznih parkova države ili celih gradova. Procene emisija na mikro nivou mogu se agregirati za dobijanje procena na makro i mezo nivou.

Modeli emisionih faktora kvantifikuju relaciju između emisija, kretanja vozila (brzine i ubrzanja) i tehničko-eksploatacionim karakteristikama saobraćajnice (npr. nagiba saobraćajnice) (NRC 2000). Karakteristični su za makroskopski nivo procene jer uglavnom uspostavljaju vezu između prosečnih karakteristika saobraćajnog toka i emisija.

Režimski (modalni) pristup u modeliranju emisija obuhvata klasiranje podataka na osnovu brzine, ubrzanja, potrebne snage (ili specifične snage) ili nekog drugog

faktora. Klase se zasnivaju na prethodno definisanim opsezima ili na statističkoj analizi. Prednost režimskog pristupa je što ne zahteva poklapanje i kalibrisanje analitičkog modela i samim tim se eliminišu greške koje se mogu pojaviti u slučajevima kada ne postoji dobro poklapanje sa podacima. Ipak, režimski modeli obuhvataju značajna uprosečavanja podataka, pošto režimi tipično predstavljaju prosečne emisije za segmente stanja u kojima se vozilo nalazi. Ovo može biti adekvatno za mezoskopsko modeliranje ali može redukovati mogućnosti modela i potencijalno ograniči primenu u procenama trenutnih emisija.

Statistički pristupi se uobičajeno koriste za poklapanje modela i empirijskih podataka. Za neke vrste modela, kao što su polinomi viših redova, definiše se da li imaju ili nemaju fizičku interpretaciju. Tako, proizvod brzine i ubrzanja ( $v \cdot a$ ) predstavlja izvedenu veličinu koja se naziva potrebna snaga, dok  $v^3 \cdot a^3$  nema fizičku interpretaciju niti značaj. Ako su formulisani na pravi način, statistički modeli mogu biti fizički verodostojni i adekvatno opisivati modelirane pojave. Osnovni izazov se odnosi na mogućnost korišćenja takvih modela u procenama emisija na mikro nivou.

Fizički pristup uobičajeno zahteva veliku količinu podataka čime se ograničava njihova praktičnost upotrebe u opštim slučajevima. Pojednostavljeni fizički modeli mogu biti značajni u razumevanju uticajnih elemenata na modelirane pojave. Npr. specifična snaga koja zavisi od brzine, ubrzanja i nagiba je dobar pokazatelj potrošnje goriva. Pošto su emisije velikog broja zagađivača u jakoj vezi sa potrošnjom goriva, specifična snaga je koristan pokazatelj u definisanju emisija.

Primarni cilj ove disertacije je da se razvije režimski model za emisiju izduvnih gasova koristeći ograničen broj izmerivih ulaznih parametara. Razmatraće se i mogućnosti uključivanje dodatnih parametara za kalibraciju modela procene trenutnih emisija.

Doprinos teze

Model koji je razvijen u tezi koristi trenutnu brzinu i ubrzanje da bi se definisale emisije vozila u različitim uslovima u saobraćajnom toku. Na osnovu toga se predviđa prosečna emisija izduvnih gasova u različitim režimima rada vozila,

odnosno uslovima usporenja, praznog hoda, ubrzanja i ravnomernog kretanja u saobraćajnom toku. Proceni emisija će biti omogućena kroz:

- Razvoj okvira za prikupljanje podataka o emisijama vozila,
- Razvoj emisionog modela za putnička vozila u uslovima stabilnog rada (na radnoj temperaturi) i pri različitim uslovima u saobraćajnom toku.

U tezi je razvijen i verifikovan model za procenu emisije štetnih gasova u odnosu na reprezentativne parametre saobraćajnog toka koji su dobijeni empirijskim istraživanjem. Zbog ograničenih resursa, od ključnog je značaja da podaci koji se prikupljaju radi procene emisija saobraćajnog toka, budu široko dostupni, jeftini i da se mogu lako prikupiti.

Kroz rad je uspostavljena veza između transportnih modela i emisionih modela. Dokazane su osnovne hipoteze koje si postavljene, a tiču se mogućnosti korišćenja transportnih modela u proceni emisija na makro, mezo i mikro modelskom nivou; mogućnosti povezivanja transportnih i emisionih modela kao i korišćenje u procesu planiranja i upravljanja saobraćajnim sistemom. Čista intuicija više nije dovoljna za razradu planova razvoja i upravljanja. Od presudne važnosti su namenski modeli pomoću kojih je moguće shvatiti složene mehanizme sistema i oceniti uticaj različitih upravljačkih politika.

Okvirni sadržaj doktorske disertacije

Na osnovu motiva za izbor ove teme kao i na osnovu predmeta istraživanja i postavljenih ciljeva, okvirni sadržaj doktorske disertacije je:

- Opis problema procene emisije zagađujućih materija koje nastaju kao posledica saobraćaja. Opis osnovnih termina kao i veza između transportnih i emisionih modela. Kontekst održivog planiranja i značaj transportnih i emisionih modela.
- Pregled faktora koji utiču na emisiju zagađujućih materija. Problem jedinica izražavanja emisija i izvora informacija koji mogu poslužiti za testiranje modela.
- Pregled trenutnog stanja tehnika koje se koriste u modeliranju emisije karakterističnih elemenata zagađenja vazduha, klasifikovanih prema

parametru koji tretiraju, prema nivou detaljnosti (mikroskopski ili makroskopski), i prema ulozi/nameni.

- Pregled i identifikovanje mogućnosti i primene postojećih modela kao i nedostataka.
- Opis predloženog modela za procenu emisije zagađujućih materija uzimajući u obzir ograničenja u dostupnim podacima za testiranje modela.
- Predlog primene razvijenog modela, za planiranje saobraćaja odnosno pomoć pri donošenju odluka u transportnim modelima i u upravljanju saobraćajem.
- Zaključna razmatranja i pravci budućih istraživanja.

## 2 Modeliranje saobraćajnih tokova u funkciji planiranja saobraćaja

Modeli se razvijaju i da bi se neke kompleksne pojave i sistemi bolje razumeli. Sistematskim praćenjem određenih pokazatelja može da se dokaže intenzitet uticaja određenih pojava na sistem. Formiranje samog modela može biti lako, ali testiranje modela može postati jako težak posao. Model koji dobro oponaša sistem može se koristiti da bi se testirale i kvantifikovale reakcije sistema na primenu upravljačkih mera. Sistem treba posmatrati u svim svojim elementima, sagledavajući svu složenost sistema. A zatim ga redukovati na relevantne procese i pokazatelje.

Modeliranje zahteva velika uopštavanja i pretpostavke. U suprotnom model može da postane beskoristan. Dve formulacije modela koje daju potpuno suprotan stav glase:

- Modeliranje zahteva shvatanje pojava u svojoj svojoj kompleksnosti.
- Modeliranje je grubo ali inteligentno redukovanje.

Treba biti svestan kompleksnosti pojave, a na drugoj strani, biti spreman na veliko ali smisleno uopštavanje. Tako modeliranje predstavlja balans između kvantiteta i kvaliteta podataka kojima raspoložemo (Kallenrode 2006).

### 2.1 Transportni modeli kao simulacioni alati

Ulična mreža je pod velikim uticajem broja i prostorne dislokacije stanovništava i gradskih aktivnosti kao generatora kretanja putnika i tokova robe. Konstantni razvoj grada uslovljava i konstantni razvoj saobraćajne infrastrukture kao podrške nesmetanom funkcionisanju grada.

Brze promene koje se dešavaju u urbanim sredinama uslovljavaju pravovremeno reagovanje na promene koje treba da se dese. Kvalitetna planska dokumentacija je od presudne važnosti za postizanje održivog razvoja gradova. Planska dokumentacija obuhvata prognoze demografskih i socio-ekonomskih pokazatelja, namena površina kao i karakteristika potreba za kretanjem i na osnovu toga, formiranje i testiranje efekata varijanti razvoja transportnog sistema. Sa razvojem gradova i naselja javlja se i povećan zahtev za saobraćajnim povezivanjem urbanih

celina. Na taj način se paralelno sa razvojem urbanih celina razvija i urbana saobraćajna infrastruktura.

Upravljanje kompleksnim sistemom kao što je saobraćajni, uslovljava formiranje jedinstvene baze podataka koja treba da služi za sve analize u vezi sa razvojem saobraćajnog sistema. Rešenje je formiranje transportnih modela. Generalna upotrebna vrednost transportnih modela je da služe:

- kao podloga za proračune u vezi sa planiranjem, programiranje, upravljanje i izgradnjom transportnog sistema;
- kao baza za različita istraživanja i naučno istraživačke projekte;
- kao osnova u procesu vrednovanja;
- kao osnova u ispitivanju optimalnih rešenja upravljanja saobraćajem;
- kao osnova za proveru efekata ITS.

Transportni modeli treba da služe kao planersko-projektna osnova za izradu:

- studija/analiza/ekspertiza transportnog sistema određenog područja koje su namenjene planiranju i programiranju razvoja, izboru strategija i/ili taktika i sl. područja za koje se rade;
- studija/analiza/ekspertiza koje se izrađuju za određene komponente transportnog sistema (vidove i/ili infrastrukture), koje su namenjene planiranju i programiranju razvoja, izboru strategija i/ili taktika i sl.;
- analiza/planova lokacija namenjenih izgradnji stanova, komercijalnog, uslužnog, industrijskog, skladišnog, pretovarnog, i sl. prostora, saobraćajnih objekata i površina, ili prostora na kojima su prisutne navedene namene u određenom odnosu;
- generalnih i idejnih projekata infrastruktura i objekata saobraćaja; i
- prethodnih i studija opravdanosti infrastruktura i objekata saobraćaja.

Transportni modeli objedinjuju socio-ekonomske podatke, podatke o nameni površina, podatke o saobraćajnoj infrastrukturi, podatke o karakteristikama kretanja, podatke o ponašanju putnika kao i sve podatke koji mogu biti relevantni za izvođenje različitih saobraćajnih analiza [Jović, 2007].

Saobraćajna slika grada je rezultanta više elemenata: ulične mreže, opterećenja saobraćajne mreže putničkim automobilima, javnog prevoza putnika, prevoza tereta i uslova parkiranja. Broj registrovanih putničkih automobila i karakteristike voznog parka se prate na godišnjem nivou i predstavlja važan ulazni podatak za analize transportnih zahteva i analize uticaja na životnu sredinu.

Stanje ulične mreže se utvrđuje radi analize mogućnosti prihvatanja uvećanih zahteva transportnog sistema koji nastaju sa porastom stepena motorizacije pa i u slučaju samo povećanog stepena korišćenja putničkog automobila. Utvrđuju se pokazatelji poput, kapaciteta primarne ulične mreže, sistema upravljanja saobraćajem prosečnih brzina u gradskim zonama, vremenskih gubitaka na deonicama itd. Praćenje ili jednokratno utvrđivanje pokazatelja stanja saobraćajnog sistema treba da dovede do zaključaka o osnovnim uzrocima promena u sistemu.

Model postojećeg stanja objedinjuje sve navedene podatke, a forma koja ih objedinjuje se naziva transportni model. Moderni softverski alati olakšavaju i ubrzaju rad sa velikim količinama podataka i formiranje transportnog modela. Transportni sistem se u transportnom modelu opisuje kroz:

- fizičke karakteristike saobraćajne mreže (kodiranje mreže),
- eksploatacione karakteristike svih podsistema,
- transportne zahteve u postojećem stanju (matrica prostorne raspodele) i
- procedure raspodele saobraćaja koje karakterišu ponašanje putnika u sistemu.

Potrebno je konstantno inoviranje podataka tako da je modelom u svakom trenutku predstavljeno aktuelno stanje sistema.

Prognoza budućeg kretanja broja stanovnika i drugih socio-ekonomskih pokazatelja je važna stavka u planiranju saobraćaja. Prate se, kako ukupne promene broja stanovnika po periodima tako i promene po različitim kategorijama. Razlozi porasta, odnosno smanjenja vrednosti pokazatelja su takođe značajni. Osnovu za planiranje budućih vrednosti, kako demografskih, tako i

prostornih mogu predstavljati podaci dobijeni popisom stanovnika i relevantnim statističkim obradama.

Planirani odnosi između vidova saobraćaja kojima će se realizovati buduća putovanja predstavljaju osnovne strateške odrednice odnosno kriterijume kojima će se težiti kroz planiranje i primenu mera. Imajući u vidu mogućnosti razvoja ulične mreže i transportnog sistema procenjuju se učesća putovanja putničkim automobilom, javnim prevozom, pešice, biciklom kao i nivo usluge, kapacitet i komfor kojima će se realizovati.

Promenom socio-ekonomskih karakteristika stanovništva i navika stanovnika menjaju se karakteristika kretanja na području. U prvom redu, to je promena mobilnosti kako ukupne tako i po načinima kretanja. Zatim, ukupan prognozirani broj kretanja i broj stanovnika kao i stepen motorizacije. Raspodele po svrhama kretanja, načinima kretanja i vremenske neravnomernosti u broju kretanja kroz vremensku raspodelu kretanja su prognozni elementi koji dovode do formiranja matrica prostorne raspodele kretanja – transportnih zahteva.

Navedeni parametri utiču na rezultate modela, koji predstavljaju raspodelu saobraćaja po saobraćajnoj mreži, izraženo u broju vozila ili putnika koji se u određenom vremenskom intervalu pojavljuju na saobraćajnoj mreži. Za svaki transportni podsistem i za svaki vremenski interval mora postojati matrica koja definiše prostornu raspodelu vozila/putnika koja predstavlja rezultat analize ili prognoze karakteristika kretanja.

Kalibracija transportnog modela treba da omogući da se ostvari dobra veza između protoka koji su dobijeni modeliranjem i brojanja saobraćaja. Na taj način se transportni model sistema testira u smislu oponašanja sistema, pre svega u domenu raspodele saobraćaja na mreži. Kod modeliranja podsistema javnog prevoza koriste se brojanja putnika u vozilima javnog prevoza i eksploatacioni pokazatelji rada vozila.

Kalibracija, pored u samom modelu mreže, može da se vrši i u transportnim zahtevima. Matrica transportnih zahteva je obično formirana na osnovu uzorka, ekspanzirana na celokupnu populaciju što je osnova za formiranje validne matrice.



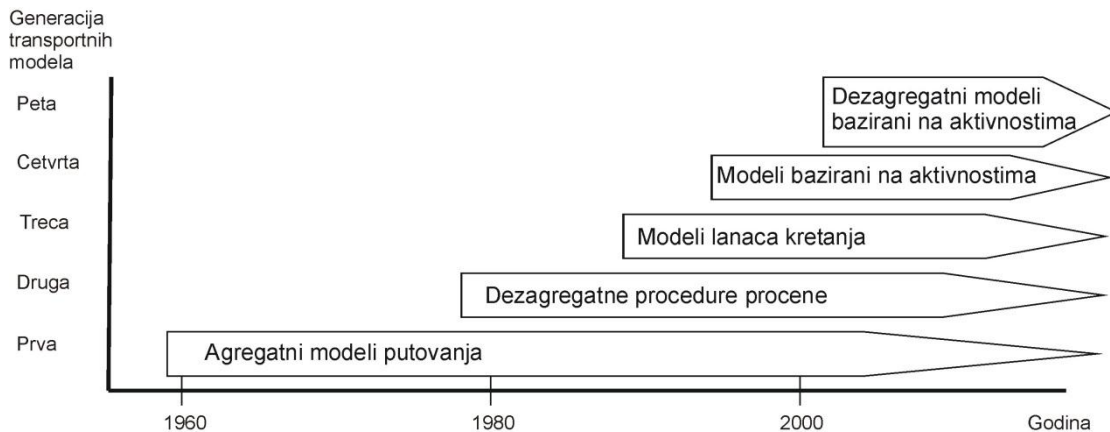
Kalibracija se primenjuje jer su saobraćajna istraživanja na velikim uzorcima skupa, a dobijeni rezultati mogu biti dovoljno kvalitetni. Istorijski podaci dobijeni saobraćajnim istraživanjima služe kao osnova za kalibraciju. Istorijska matrica sadrži podatke o šablonu kretanja na određenom području i rezultat je istraživanja. Za kalibraciju su potrebna validna brojanja saobraćaja i procena ukupnog broja kretanja za konkretno područje u konkretnom vremenskom intervalu. Bez dobro kalibrisanog transportnog modela nema kvalitetnih rezultata.

Namena površina utiče na prognozne matrice prostorne raspodele kao i razvoj kompletnog saobraćajnog sistema. Ukupni kapacitet i opterećenje transportnih podsistema na koridorima i skrin linijama mogu predstavljati element kontrole. Razvojem scenarija vezanih za određene vremenske preseke pokrivaju se mogućnosti greške u određenim fazama razvoja sistema i kvantifikovanja efekata razvoja.

#### *Istorijat modela prognoza transportnih zahteva u planiranju saobraćaja*

Dva su osnovna pristupa u modeliranju transportnih zahteva: agregatni i dezagregatni. U suštini, glavna razlika u pristupima leži u načinu opisivanja ponašanja, naročito u toku procesa razvoja modela. Kod agregatnog se podaci prikupljaju na nivou saobraćajnih zona, dok je kod dezagregatnog nosilac informacije porodica ili pojedinac. U većini slučajeva dezagregatni pristup omogućava veći nivo detaljnosti od pristupa u kom se grupišu podaci o ponašanju na nivou zone. Ipak i danas se agregatni modeli koriste u velikoj meri zbog svoje jednostavnosti i zadovoljavajućeg nivoa preciznosti (Ortuzar & Willumsen 2011). Ova podela se odnosi na makroskopske i mezoskopske modele, s obzirom da su mikroskopski modeli po svojoj prirodi dezagregatni.

Na sledećoj slici prikazan je istorijat razvoja transportnih modela (Slika 2-1).



Slika 2-1. Istorijat razvoja transportnih modela

Izvor (Vuk G, Traffic and Mobility: Personal Travel Behaviour, DTU Transport)

Agregatni modeli korišćeni su intenzivno u transportnim studijama do kasnih 70-tih godina. Oni su bili kritikovani zbog svoje nefleksibilnosti, nepreciznosti i velikih troškova. Pošto su zasnovani na grupnom ponašanju, nisu dobro opisivali stvarne razlike koje egzistiraju u ponašanju. U tom periodu mnoga ispitivanja na nivou pojedinca nisu uspela da uzmu udeo u prognozi, u većini slučajeva zato što su zahtevala podatke koji nisu mogli da budu prikupljeni.

Dezagregatni modeli koji su počeli da se primenjuju tokom 80-tih godina ponudili su značajne prednosti u odnosu na tradicionalne metode. Praktičan problem dezagregatnih modela je zahtevali visok nivo statističkih i ekonometrijskih stručnih znanja za upotrebu, a posebno za izlaganje rezultata. Zahtevani nivo znanja bio je viši, pogotovo u odnosu na nivo znanja potreban za agregatne modele.

Dezagregatni modeli zasnivaju se na individualnom ponašanju domaćinstva ili stanovnika. To omogućava da se razumeju razlozi koji utiču na realno ponašanje članova domaćinstva i njihovih putovanja, kao i bolje iskorišćenje dostupnih podataka. Kroz razmatranje individualnog ponašanja i traženje stvarnih uzajamnih veza, postoji šansa da se razvije opšti model koji može, uz određena ograničenja, da se prenosi sa jednog područja na drugo i sa jedne populacije na drugu.

Dezagregatni modeli pored svih dobrih osobina imaju i nedostatke koji se ogledaju u obimnijoj i skupljoj obradi podataka, složenijoj grafičkoj interpretaciji i teškoći u formiranju agregatnih jedinica na potrebnom nivou. U većini slučajeva prognoze i

procene osetljivosti moraju biti prikazane na agregatnom nivou, tj. moraju prikazati ponašanje celokupnog stanovništva. Upravo zato analitičari koji koriste dezagregatne modele moraju naći razumnu metodu za povezivanje svojih rezultata kako bi dobili pokazatelje potrebne za prognoze i procene osetljivosti. Ta metoda je jednostavna, a jedini praktični problem jeste procena raspodele nezavisnih promenljivih i njihova obrada koja je komplikovanija.

Sekvencijalni modeli se razlikuju u zavisnosti od osnovne jedinice kojom se izražavaju transportni zahtevi. Jedinice transportnih zahteva po svojoj kompleksnosti mogu biti: pojedinačno kretanje između izvora i cilja (putovanje), niz kretanja vezan za mesto stanovanja (lanac) ili dnevni/nedeljni program kretanja (šema).

Modeli putovanja su zasnovani na hipotezi da izbori koji su u vezi sa različitim kretanjima nisu međusobno zavisni. Modeli putovanja u klasičnim transportnim modelima predviđaju ukupan broj kretanja koji nastaje na određenom području ili u okviru određene populacije. Prognoza se zasniva na socio-ekonomskim karakteristikama (Ortuzar & Willumsen 2011).

Modeli lanaca kretanja, za razliku od prethodnih, uzimaju u obzir prostornu i vremensku povezanost između putovanja koja čine lanac kretanja. Osnovna karakteristika lanaca kretanja je primarni cilj kretanja, koji se definiše kao lokacija u kojoj se obavlja najvažnija aktivnost (Ortuzar & Willumsen 2011).

Modeli aktivnosti. Veza između segmenata aktivnosti (šema-lanac-putovanje) daje individualnu opštu karakteristiku ponašanja u odnosu na način prevoza, cilj, vreme prevoza, itd. Potencira se veza između sukcesivnih putovanja. Model zasnovan na aktivnostima mogu biti agregatni i dezagregatni. Dezagregatni pristup je razvijen da bi se modeliralo individualno ponašanje putnika. Kroz dezagregatni pristup se teži da se prevaziđu greške koje nastaju usled uopštavanja i uprosečavanja podataka.

#### *Koristi i štete u modeliranju*

Primena planerskih modela je široko zastupljena u planiranju transportnog sistema. Koristi od modela su sledeće:

- Modeli omogućavaju simuliranje različitih okolnosti koje se mogu predvideti, a time i efekte koji prouzrokuju pojedine planske veličine.
- Mogu se testirati za kratko vreme brojne alternative razvoja (kao rezultat primene računara).
- Formiranje, kalibriranje i testiranje modela doprinosi shvatanju zavisnosti planerskih veličina, pa je u tom smislu veoma značajan rezultat, koji se izražava u sticanju planerskog iskustva i planerske filozofije.
- Kada se ovlada tehnikom, moguće je kroz testirane programe značajno povećati produktivnost i skratiti vreme za dobijanje prognoznih veličina u potrebnom broju alternativa.
- Kod već oprobanih lanaca modela moguće je direktno dobijati rezultate na principu "crne kutije", što omogućuje uključjenje manje kvalifikovanog kadra u rutinske faze planiranja.

Pored neospornih kvaliteta, za modele se vezuje i niz nedostataka:

- Rad sa modelima može da troši mnogo vremena i sredstava uz zahteve za korišćenje kvalitetne računarske opreme i softvera.
- Modeli najčešće ne obuhvataju veoma značajne parametre koji su važni za odlučivanje, pa je značajno odstupanje od realnih veličina.
- Previše značaja pridaje se formiranju i korišćenju modela, a premalo planerskoj strategiji i tumačenju dobijenih rezultata.
- Rešenja se planiraju za period od 20 godina, a problemi već postoje i treba ih rešavati odmah u periodu koji prethodi planskoj godini.
- Modeli zahtevaju značajan obim teško dostupnih ili skupih podataka, uz složenu obradu.
- Često se zanemaruju činjenice da su modeli "alat" odnosno pomoćno sredstvo i da je neophodna kvalifikovana interpretacija rezultata i tek na toj osnovi formiran predlog.

Modeli su pomoćno sredstvo za preciznije sagledavanje transportnih zahteva u uslovima simultane promene većeg broja ulaznih planerskih pretpostavki. Modeli ne daju gotova rešenja, već planerima omogućavaju da sagledaju okolnosti razvoja

koje nije moguće sagledati bez modela zbog složene međuzavisnosti pojedinih parametara (Jović 1996).

Izgradnja novih elemenata saobraćajne infrastrukture generiše nova kretanja odnosno nove transportne zahteve. Posledično, izgradnja saobraćajnica generiše izgradnju novih saobraćajnica. Analogno tome, upotreba transportnih modela inicira još veću upotrebu transportnih modela i širenje domena upotrebe. Rezultati dobijeni modeliranjem su veoma često scenariji razvoja sistema odnosno prognoze razvoja sistema. Tako dobijene prognoze pokreću niz drugih procena i prognoza zasnovanih na modeliranju, kao npr. prognoza razvoja transportnog sistema može imati za posledicu razvoj modela procene efekata uticaja saobraćaja na životnu sredinu, modela za vrednovanje ili modela razvoja namene površina (Kallenrode 2006).

## **2.2 Kontekst održivosti**

Održivi način života je neophodnost jer ako se potroše svi izvori energije i generiše visok nivo zagađenja opstanak nije moguć. Po jedinici proizvedene robe troši se sve manje energije. Ipak usled povećanja broja stanovnika količina potrošene energije je u stalnom porastu (Interacademy Council/IAC 2007).

U opticaju je veći broj definicija održivog transporta i održivog planiranja. Definicija se vremenom menja, nadopunjuje i više autora i institucija se bavilo definisanjem ovih pojmova:

Održivi transportni sistem je onaj čiji je nivo potrošnje goriva, emisije, bezbednosti, zagušenja i socio-ekonomskih pokazatelji prihvatljiv u budućnosti i ne izaziva nepopravljivu štetu narednim generacijama (Richardson 1999).

Transport koji ne ugrožava javno zdravlje ili ekosistem i omogućava zadovoljenje potreba za kretanjem: pomoću obnovljivih resursa ispod njihovog stepena obnavljanja i neobnovljivih resursa ispod njihovog nivoa proizvodnje (OECD 2002).

Održivo planiranje predstavlja kratkoročno planiranje u skladu sa dugoročnim, strateškim, regionalnim i globalnim ciljevima (Litman 2013).

Prema Savetu ministara evropske unije za transport, održivi transportni sistem:

- Omogućava da mobilnost i razvojne potrebe pojedinca, kompanija i društva budu zadovoljene na bezbedan način po zdravlje ljudi i ekosistema i jednakost generacijama koje dolaze.
- Priuštitiv, funkcionije pravedno i efikasno, daje mogućnost izbora sredstava, podržava konkurentnost i regionalni razvoj.
- Ograničava emisiju štetnih materija i smeća u granicama koje mogu da se apsorbuju, koristi obnovljive resurse ispod njihovog stepena obnavljanja i neobnovljive resurse ispod njihovog nivoa proizvodnje, i pri tome, minimizira uticaj na zauzimanje zemljišta i nivo buke.

Transportation Association of Canada (TAC) definiše da održivi transportni sistem:

- U prirodnoj sredini treba da ograničava emisiju štetnih materija i smeća u granicama koje mogu da se apsorbuju, obezbeđuje energiju iz obnovljivih i neiscrpnih izvora (solarna energija) i reciklira prirodne materijale koji se koriste za vozila i infrastrukturu (čelik, plastika ...)
- U društvu treba da omogući ravnopravnost pristupa za ljude i robu u sadašnjosti i budućnosti, poboljša ljudsko zdravlje, podrži kvalitetniji život u skladu sa mogućnostima, usaglasi urbani razvoj sa razvojem populacije, održava nivo buke ispod propisanih granica i bude bezbedan za ljude i njihovu imovinu.
- Ekonomski treba da bude dostupan svim generacijama, dizajniran i radi kao ekonomski efikasan sistem i podržava jaku, raznovrsnu ekonomsku aktivnost.

U okviru održivog društva očekuje se da svaki pojedinac ima pravo na bolji kvalitet života. Briga za održivost u svim aspektima društva proizilazi iz stalne specijalizacije poslova i tendencije da je fokus donosioca odluka usmeren ka lako izmerivim uticajima i ciljevima, zanemarujući uticaje koji se teže kvantifikuju. Konvencionalno planiranje se zasniva na rešavanju određenog problema bez obzira na posledice primenjenih mera u drugim sferama i oblastima (Litman 2011).

Javlja se potreba za sistemskim pristupom u planiranju. Uzima se u obzir širi spisak ciljeva i uticaja bez obzira koliko ih je teško kvantifikovati. Rešenje može biti dobro ako proizvodi manji uticaj ali na veći broj definisanih ciljeva. Održivo planiranje se često oslanja na tri donje granice koje se odnose na ekonomiju, društvo i ekološki uticaj.

Kod konvencionalnog planiranja postavlja se pitanje: «Da li radi?», dok je kod održivog planiranja pitanje: «Da li se uklapa?», u smislu, akcenta koji se stavlja na uklapanje mera u ukupan sistem i globalne ciljeve (Litman 2011).

Kroz neke osnovne principe su definisani osnovni ciljevi održivog planiranja.

- **Sistemska analiza.** Održivo planiranje treba da obuhvati ekonomski, društveni i ekološki uticaj kao i indirektni, dugoročni i neekonomski efekat. Potrebno je imati adekvatne informacije i alate za vrednovanje koji omogućavaju donosiocima odluka i zainteresovanim stranama da kvantifikuju efekte primenjenih mera.
- **Strateško planiranje.** Planske mere moraju da budu u saglasnosti sa strateškim planovima, planovima višeg nivoa (planirana namena površina).
- **Fokus na ciljevima, karakteristikama i rezultatima.** Ciljevi ka kojima je orjentisano održivo planiranje su npr. pristupačnost, opšte dobro ili ekološko stanje.
- **Tržišni principi.** Obuhvataju slobodu izbora i ekonomsku ravnopravnost koje omogućuju održive izlazne rezultate. Reforma tržišta je neophodna da bi se sprečila degradacija životne sredine i preterana upotreba određenih prirodnih resursa.
- **Mere predostrožnosti.** Podržavaju se principi predostrožnosti koji ističu važnost uključivanja rizika u proces donošenja odluka i favorizovanje mera koje minimiziraju rizike.
- **Energetska efikasnost.** Održivost favorizuje rešenja koja povećavaju efikasnost i redukuju korišćenje energije, usled neizvesnosti na tržištu u budućnosti i ekoloških uticaja.
- **Transparentnost i uticaj javnosti.** Potrebna je dobra komunikacija sa svim zainteresovanim stranama.

Između saobraćaja i održivosti postoji interakcija odnosno međusobni uticaj.

Saobraćajni objekti i sam saobraćaj imaju veliki uticaj na održivost u svim aspektima (ekonomski, društveni i životne sredine).

Tabela 2-1. Uticaj saobraćaja na održivost

<i>Ekonomija</i>	<i>Društvo</i>	<i>Životna</i>
Zagušenja	Neravnopravnost	Zagađenje
Prepreke u mobilnosti	Smanjena	Klimatske
Saobraćajne nezgode	Zdravlje ljudi	Gubitak
Građevinski troškovi	Kohezija društva	Zagađenje
Transportni troškovi	Mogućnost	Hidrološki
Trošenje	Narušavanje	Uticaj na buku

Strategije koje povećavaju efikasnost transportnog sistema i smanjuju negativan uticaj saobraćaja predstavljaju jedne od najefikasnijih mera ka ciljevima održivog saobraćaja. Pošto je uticaj saobraćaja širok, potrebno je identifikovati strategije koje imaju uticaj na više ciljeva istovremeno (Immers & Stada 1998).

Većina strategija koje vode ka održivom transportu u sebi imaju upravljanje mobilnošću ili tehničke inovacije. Ipak kombinovanje strategija daje najbolje rezultate u dostizanju ciljeva. Npr. energetska efikasnost i vozila na alternativni pogon mogu se simultano koristiti radi ostvarivanja ciljeva smanjenja zagađenja vazduha ali je upravljanje mobilnošću potrebno da bi se ostvarili uštede pri izgradnji objekata i uticalo na vidovnu raspodelu.

Karakteristike održivosti se određuju indikatorima održivog saobraćaja. Održivost treba na neki način kvantifikovati pa se za to koriste indikatori. Neki od njih su dosta specijalizovani, dok drugi pokrivaju širi opseg ciljeva (Litman 2013).



Tabela 2-2. Indikatori održivosti

Indikator	Opis indikatora
Pristupačnost	Mogućnost pristupa aktivnostima, robi ili uslugama
Razmeštaj aktivnosti	Namena površina
Osnovna pristupačnost	Objektima od značaja: bolnice, usluge, obrazovanje, kupovina, sa posebnim osvrtnom na osobe sa posebnim potrebama
Pristupačnost aktivnostima	Prosečan broj osnovnih sadržaja (škole, prodavnice, administracija) u okviru pešačke dostupnosti
Pristupačnost dece	Broj dece koja biciklom ili pešice idu do škole, parka ili prodavnice
Uticao saobraćaja na namenu površina	Zauzeće prostora saobraćajnom infrastrukturom
Raznovrsnost ponude	Raznovrsnost ponude vidova prevoza i kvaliteta
Vidovna raspodela	Udeo kretanja obavljen različitim načinima prevoza
Javni prevoz	Parametri kvaliteta javnog prevoza: brzina, frekvencija, komfor, ekonomičnost, bezbednost, dostupnost informacijama, kao i pokrivenost područja i opsluženost stanovništva JP-om
Efikasnost komercijalnih vozila	Efikasnost sistema teretnog transporta, a pre svega sistema snabdevanja
Nemotorizovana kretanja	Uslovi za odvijanje biciklističkog i pešačkog saobraćaja
Brzina	Brzina određenih kategorija putnika i karakteristična vremena
Brzina migranata	Prosečno vreme putovanja migranata
Vremenski gubici	Vremenski gubici u sistemu i po vidovima prevoza
Troškovi	Ukupni troškovi
Troškovi izgradnje	Troškovi izgradnje saobraćajnih i parking objekata
Troškovi prevoza	Troškovi transporta sa akcentom na osobe sa invaliditetom
Planiranje	Metode koje karakterišu planerski proces
Planerska praksa	Odabir najekonomičnijih rešenja od strane vlasti
Planski proces	Opseg rešenja koja se primenjuju u planiranju
Mobilnost	Mobilnost određenih kategorija putnika
Mobilnost ljudi koji ne voze	Izmeritelji mobilnosti ljudi koji ne voze
Mobilnost ljudi sa posebnim potrebama	Izmeritelji mobilnosti i pristupačnost objektima naročito za slabovide i ljude u kolicima
Životna sredina	Efekti saobraćaja na životnu sredinu
Emisija štetnih materija od saobraćaja	Emisija štetnih gasova i čvrstih materija koje utiču na životnu sredinu i zdravlje ljudi
Emisija buke od saobraćaja	Emisija buke koje utiču na životnu sredinu i zdravlje ljudi
Zagađenje vode od saobraćaja	Zagađenje voda prouzrokovano emisijom štetnih gasova i čvrstih materija
Javno mnjenje	Učešće javnog mnjenja tokom planerskog procesa
Ocena korisnika	Ankete i mišljenja korisnika o predloženim ili primenjenim rešenjima
Učešće javnog mnjenja	Učešće svih zainteresovanih strana
Estetski uticaj	Uticaj saobraćaja na izgled područja

Prva grupa indikatora se odnosi na razmeštaj aktivnosti i pristupačnost aktivnostima. Kod razmeštaja aktivnosti naročito su bitni osnovni sadržaji (škole, prodavnice, administracija) i površine zauzete saobraćajnom infrastrukturom, a veliki značaj mogu imati indikatori tipa: broj radnih mesta i usluga u krugu od 30 minuta od mesta stanovanja. Pristupačnost treba da bude definisana u oblastima globalne pristupačnosti robi, uslugama i aktivnostima ali i sa posebnim akcentom na: pristupačnost osnovnim sadržajima i važnim objektima (npr. bolnice); i određene grupe ljudi (deca i osobe sa posebnim potrebama).

Druga grupa su indikatori vezani za vidovnu raspodelu. Trendovi održivosti podstiču favorizovanje javnog masovnog prevoza putnika i nemotorizovana kretanja u odnosu na kretanje putničkim automobilom. Indikator koji reprezentuje kvalitet javnog prevoza može biti u formi 5-0 minutne pešačke pokrivenost do prevoza koji traje 15 minuta.

Vremenski gubici po vidovima prevoza su osnova za utvrđivanje nivoa usluge koji je na raspolaganju putnicima, a u određenim sredinama može biti važno utvrditi i vremena putovanja za određene grupe putnika (npr. migranti).

Ostali indikatori se odnose na:

- Troškovi izgradnje i transporta sa posebnom pažnjom na osobe sa invaliditetom;
- Planersku praksu u smislu opsega rešenja koja se primenjuju i kriterijuma izbora rešenja;
- Mobilnost određenih kategorija stanovništva;
- Emisije štetnih materija i segmente životne sredine na koje utiču;
- Učešće javnog mnjenja u procesu formiranja i aplikacije rešenja;
- Estetski izgled.

*Savremeni kontekst modeliranja saobraćaja u odnosu na konvencionalne procedure planiranja*

Rešavanje saobraćajnih problema izgradnjom novih saobraćajnih kapaciteta pored svojih prednosti ima i negativne efekte. Pre svega, gradnja novih objekata se odvija u urbanoj sredini ili opslužuje urbanu sredinu koristeći obodni pojas područja.

Zauzima se zemljište i prostor kome se na taj način menja namena, bilo da je u pitanju postojeća saobraćajnica, stambeno ili poljoprivredno zemljište. Samim tim, transportni sistem menja svoje performanse po pitanju prostornog rasporeda kapaciteta. Na taj način se nekim stanovnicima i korisnicima sistema poboljšava ili pogoršava položaj sa aspekta pristupačnosti sistemu.

Izgradnja infrastrukture generišu određene direktne, indirektno ili u širem smislu društvene efekte. Pod uticajem društvenih efekata uspostavljaju se novi saobraćajni zahtevi (potražnja) i to u dužem najčešće srednjeročnom periodu posmatranja (Depolo 2006). Poznat je paradoks da izgradnja može proizvesti i veće probleme od onih koji pokušavaju da se reše u situacijama kada infrastruktura indukuje veliki transportni zahtev koji će držati sistem na istom ili višem nivou iskorišćenja kapaciteta u odnosu na postojeće stanje (Vukanović 1997). Pored građevinskih efekata treba posmatrati sistem na funkcionalnom nivou, u odnosu na transportne podsisteme koji nose teret prevoza ljudi i robe na teritoriji grada.

Sa povećanjem zahteva u transportu robe i ljudi u gradovima, posledično se javlja veći broj teretnih vozila, vozila javnog prevoza i automobila na ulicama. Tehnologija je uspešno pratila rastuće zahteve u prostorno ograničenim urbanim sredinama nudeći nova saobraćajna rešenja. U transportu putnika dostupni su različiti moderni podsistemi transporta koji se mogu prilagoditi potrebama putnika. Teretnim vozilima se građevinskim ili upravljačkim merama onemogućava pristup centralnim gradskim područjima, a dostavna vozila zamenjuju novim koja svojim dinamičkim karakteristikama u manjoj meri utiču na karakteristike saobraćajnog toka. Putnički automobili se "vode" po mreži saobraćajnica korišćenjem inteligentnih transportnih sistema upravljanja saobraćajem.

U poslednjoj deceniji dolazi do promene u konceptualnom pristupu u planiranju saobraćaja koji se ogleda u uključivanju sve većeg broja efekata koje saobraćaj proizvodi. Uvodi se termin održivosti koji je iskorišćen za stvaranje termina kao što su održivi transportni sistem, održivi saobraćaj, održivi transport itd. U početku je termin korišćen proizvoljno bez ulaska u suštinu promene koju ovakav

pristup treba da nosi. Sa pozitivnim iskustvima i praksom u razvijenim zemljama nivo znanja iz oblasti održivosti se produbljuje i bolje definiše. Veliki broj naučnih radova prati celokupnu oblast održivog saobraćaja i novog pristupa u planiranju saobraćaja.

Konvencionalno planiranje pretpostavlja da je transportni proces sa aspekta vidova transporta linearan. Novi i brži transportni sistemi, zamenjuju stare i sporije sisteme. Takve akcije mogu da proizvedu zagušenja i barijere u pristupačnosti, na taj način destimulišući kretanje ostalim vidovima, a naročito nemotorizovana kretanja.

Održivo planiranje se koristi principom da svaki vid prevoza može biti koristan u stvaranju izbalansiranog sistema. Vidove treba koristiti tako da pružaju maksimalnu efikasnost. Stare vidove treba popravljati u granicama u kojima ostvaruju korist i izbegavati preterano forsiranje novih vidova. Veliki broj gradova primenjuje strategije koje predviđaju favorizovanje nemotorizovanih načina kretanja, javnog prevoza i destimulisanje korišćenja automobila u zagušenim urbanim sredinama. Daje se prioritet u kretanju pešacima i biciklistima u odnosu na motorna vozila, a komfor i bezbednost dobijaju primarni značaj u odnosu na brzinu kretanja.

S druge strane, principi održivog planiranja menjaju filozofski pristup u planiranju saobraćaja. Menja se uobičajeno stanovište o primarnom značaju saobraćajnih problema i uzima u obzir širi opseg uticaja rešenja, indirektni i kumulativni efekti primenjenih mera i razmatraju se efekti upravljanja mobilnošću. Održivo planiranje treba da podržava primenu efikasnijih transportnih sistema koji imaju minimalne nepovoljne uticaje u svim oblastima.

Konvencionalno planiranje se svodi na rešavanje saobraćajnih problema. Definisane kapaciteta elemenata sistema tako da se obezbedi zadovoljenje transportnih zahteva koji se ispostavljaju pred sistem. Ključna reč je kapacitet, planiranje se svodi na balansirani razvoj kapaciteta koji će moći da zadovolje buduće potrebe za kretanjem. U okviru tog pristupa razvijeni su složeni modeli, pre svih modeli koji su sastavni deo četvorostepenog pristupa: modeli nastajanja

kretanja, prostorne i vidovne raspodele kao i modeli raspodele saobraćaja po mreži.

U suštini postoji nekoliko osnovnih karakteristika održivog planiranja saobraćaja.

- Sklad sa strateškim ciljevima planiranja. Konvencionalno planiranje često nije bilo ukomponovano u strateško planiranje. Nije postojala saglasnost između planskih dokumenata višeg nivoa. Saglasnost sa planskim dokumentima jeste deo procedure konvencionalnog planiranja ali u praksi ti segmenti različitih strateških nivoa često nisu bili u vremenskoj i funkcionalnoj vezi. Glavna karakteristika pristupa zasnovanom na održivosti je prepoznavanje potrebe za kvalitetnim planovima višeg (strateškog) nivoa koji će služiti kao osnova za planove nižeg nivoa.
- Ciljevi planiranja se pomeraju ka čoveku. To je neka vrsta renesanse u planiranju saobraćaja. Čovek je na prvom mestu, što znači da treba obezbediti efikasan prevoz sa što manjim negativnim efektima. Takav pristup znatno povećava težinski faktor upotrebe nemotorizovanih načina kretanja, efekata saobraćaja na zdravlje ljudi i zagađivanje čovekove okoline.
- Cilj je obuhvatiti što je širi mogući uticaj saobraćaja, kako pozitivan tako i negativan. Tri osnovne kategorije u koje se mogu svrstati uticaji saobraćaja su ekonomski, društveni i uticaj na životnu sredinu. Te tri kategorije su ovo što najupečatljivije opisuje pristup zasnovan na održivosti.
- I dalje je reč o inženjerskom pristupu. Zahteva se kvantifikacija svih efekata koje saobraćaj proizvodi. U konvencionalnom planiranju ekonomski kriterijum je bio najznačajniji. Najekonomičnije (najjeftinije za izvođenje) rešenje je bilo i najbolje. Primarni zahtev je bio rešavanje saobraćajnog problema uz minimalna ulaganja. U okviru održivog planiranja, takođe se bira najekonomičnije rešenje ali je broj komponenata koji čine cenu saobraćajnog rešenja znatno veći. Kroz generalisani trošak su iskazani svi elementi održivosti: cena poduhvata, ekonomske uštede (vremena putovanja, goriva, maziva, guma itd.), društveni efekti izraženi kroz novac, uticaji na životnu sredinu, zdravlje ljudi takođe novčano definisani kao i

eksterni troškovi (zagušenja itd.). Da bi svaka od komponenata generalisane cene mogla da bude određena potrebna su obimna istraživanja i procene. S druge strane, u različitim društvenim zajednicama će cene različitih elemenata biti različite. Za svaku komponentu može postojati karakterističan težinski faktor. Tako, bogatije društvene zajednice mogu sebi da priušte veći značaj uticaja na životnu sredinu što u krajnjem skoru može voditi ka odabiru rešenja koje je skuplje ali na zadovoljavajući način tretira probleme životne sredine i zdravlja ljudi.

I dalje je pristup u planiranju saobraćaja oslonjen na ravnotežu koja je potrebna između ponude sistema i potražnje (zahteva koji se pred sistem postavljaju). Vremensko usaglašavanje planerskih akcija da se obezbede pravovremene mere za obezbeđivanje potrebnih kapaciteta je i dalje u osnovi planiranja saobraćaja. Stanje ravnoteže ponude i potražnje je ono što je ciljna funkcija. Obezbeđivanje ravnoteže u svakom trenutku vremenskog perioda planiranja je optimalno (Jovanović 1990; Jović 1996).

$$Ponuda = Potražnja \quad (1)$$

Razlika se suštinski u strani jednačine na koju se deluje. U okviru konvencionalnog planiranja saobraćaja planerske mere koje se predlažu su skoro isključivo na strani ponude. Na taj način se sledi princip da sve zahteve koji se pojave treba i opslužiti u onom obliku u kome se i pojavljuju (definisani načinom i vremenom). U održivom planiranju saobraćaja deluje se na obe strane jednakosti. Konvencionalne mere uticaja na ponudu transportnog sistema ostaju neophodne kod većih potreba za infrastrukturnim objektima. Ali znatno veći značaj se daje merama kojima se utiče na potražnju i promenu karakteristika transportnih zahteva. U tom segmentu mera postoji veoma veliki skup mera koje pripadaju različitim oblastima čiji je cilj prilagođavanje karakteristika kretanja kapacitetima transportnog sistema. Prilagođavanje karakteristika kretanja odnosi se na transformaciju zahteva u vremenu (rasterećenje vršnog sata), u prostoru (upravljanjem namenom površina), po načinu (modal shift - preraspodela kretanja ka pogodnijim načinima kretanja), po količini (fleksibilno radno vreme i rad od

kuće) itd. U osnovi svega je upravljanje mobilnošću (MM) odnosno upravljanje transportnim zahtevima (TDM). Osnovni princip je efikasno iskorišćenje postojeće infrastrukture, odnosno izvući maksimum iz onoga što već postoji. Ne favorizuje se nijedan tip mera (građevinske, upravljačke, regulativne, političke, organizacijske itd.). U ovom segmentu do izražaja dolaze planovi višeg nivoa koji treba da definišu strateške ciljeve na osnovu kojih se oblikuje skup mera koje proizilaze iz procesa planiranja saobraćaja.

Ono što je konstanta u oba pristupa je primena transportnih modela na različitim nivoima planiranja. Planerski modeli su veoma rasprostranjeni u svojoj upotrebi, modularni pristup je veoma lako integrisao modele za procenu buke, emisije štetnih gasova, disperzije zagađenja što obezbeđuje osnovu za kvantifikovanje efekata.

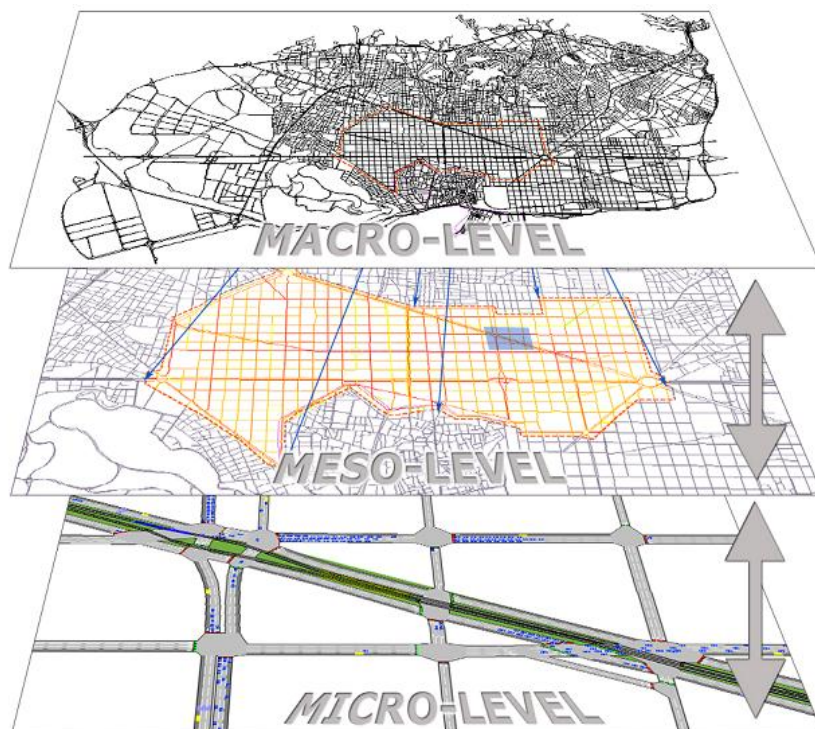
### **2.3 Pristupi u modeliranju saobraćaja i emisija**

Do sada su se transportni modeli pominjali prevashodno u kontekstu planiranja saobraćaja odnosno procena makroskopskih pokazatelja eksploatacionih pokazatelja celokupnog transportnog sistema. Simulacije u transportnim modelima se koriste i za procenu promene saobraćaja na mreži u procesu regulisanja i upravljanja transportnim sistemom. Modeli obezbeđuju alat za procenu eksploatacionih pokazatelja u saobraćajnom toku na manjim prostornim jedinicama kao i individualno ponašanje svakog vozača (vozila). Simuliraju se individualno ponašanje i interakcija vozila da bi se predvidele mogućnosti sistema. Transportni modeli mogu da se razvijaju na tri osnovna nivoa. S obzirom da se emisijski modeli koriste u sinergiji sa transportnim modelima podela se može primeniti i na njih. Tri nivoa modeliranja su (Barceló et al. 2005):

- makroskopski
- mezoskopski i
- mikroskopski.

Ova podela je zasnovana na prostornoj obuhvatnosti modela i nivou detaljnosti. Prostorna obuhvatnost makroskopskih modela je najšira pa se mogu modelirati saobraćajne mreže celih država, regiona ili gradova, a nivo detaljnosti je najmanji.

Mezoscopski modeli se formiraju za manje prostorne jedinice kao što su delovi gradova, urbani distrikti ili zone sa povećanim nivoom detaljnosti makroskopske modele. Nivo detaljnosti se pre svega odnosi na modeliranje elemenata saobraćajne infrastrukture: modeliranje deonica kroz detaljnije podatke o raspodeli saobraćajnih traka, preciznije opisivanje čvorova (raskrsnica) kroz planove rada svetlosnih signala itd. U makroskopskim modelima se raskrsnice posmatraju kao tačke, a deonice su celom svojom dužinom istog profila. Definišu se dozvoljena skretanja na raskrsnicama ali ne i gubici pri prolasku kroz raskrsnicu. Na mezoscopskom nivou raskrsnica može biti dodatno određena raspodelom saobraćajnih traka u zoni raskrsnice kao i podacima o raspodeli zelenog i crvenog vremena po smerovima. Mikroskopski nivo će zahtevati precizno modeliranje geometrije deonica i raskrsnica i precizno definisanje signalnih planova svetlosnih signala. Takav nivo preciznosti podataka uslovljava da je prostorna obuhvatnost svedena na poteze od nekoliko raskrsnica.



Slika 2-2. Nivoi transportnih modela (Barceló et al. 2005)

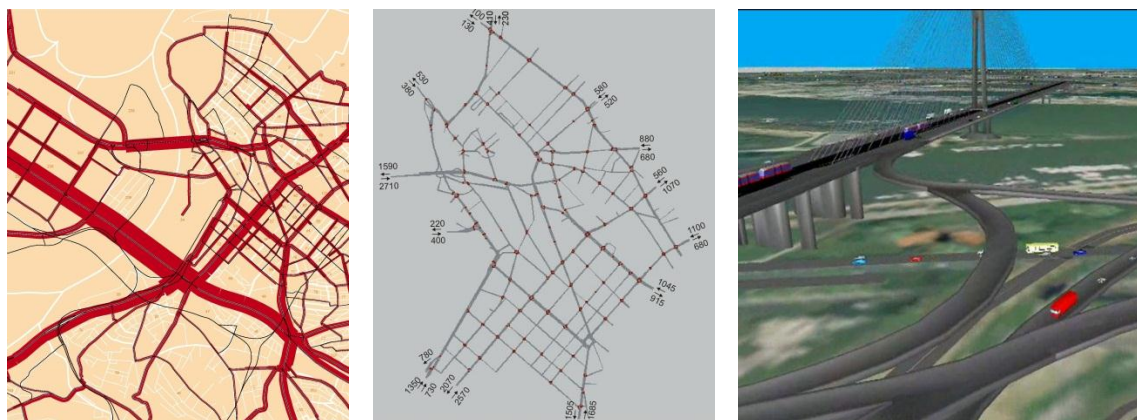
Makroskopskim transportnim modelima se mogu predstaviti cela područja gradova ali se ne mogu predstaviti individualna vozila ili putnici na mreži.



Karakteristike se grupišu (agregiraju) na nivou dužih vremenskih intervala (obično jednog časa) što ih čini neosetljivim na vremenske neravnomernosti. Raspodela saobraćaja će zavisiti od definisane funkcije promene vremena u odnosu na iskorišćenje kapaciteta deonice (VD – volume delay).

Na suprotnoj strani su mikroskopski modeli kojima se predstavlja neki mali segment saobraćajne mreže. Retko se koriste za simulacije na većim zonama jer bi to zahtevalo veliku količinu podataka i otežalo kalibraciju modela. Rezultati su visokog nivoa preciznosti s obzirom da je uobičajeni vremenski interval od jedne sekunde. Raspodela saobraćaja na mreži omogućava praćenje pozicije vozila u svakoj sekundi.

Mezokopski modeli se nalaze između dva prethodna. Mogu da se predstavje veće prostorne zone od mikro modela i da se dobiju precizniji rezultati od makroskopskih modela. Rezultati raspodele saobraćaja omogućavaju generisanje vremenskih gubitaka na raskrsnicama u kraćim vremenskim intervalima koji se podudaraju sa intervalima na kojima je matrica podeljena.



Slika 2-3. Razlike u prezentaciji rezultata: makro, mezo i mikro nivo

U sve tri klase modela transportni zahtevi su predstavljeni IC (izvor-cilj) matricama čija polja predstavljaju razmenu kretanja između izvora i cilja kretanja za određeni vremenski period i određenu svrhu kretanja. Izvori i ciljevi su predstavljeni kao imaginarne tačke u prostoru ili centriodi saobraćajnih zona u kojima kretanja nastaju i završavaju. Razlike su definisane u načinu raspodele saobraćaja na mreži. Kod makroskopskih modela raspodela je bazirana na statičkom opterećenju što znači da je matrica zahteva ista za ceo posmatrani

vremenski interval dok je kod mezoskopskog i mikroskopskog modela matrica podeljena na matrice manjih vremenskih intervala čime se reprezentuje vremenska neravnomernost transportnih zahteva.

Procene emisija su značajni rezultati koji se dobijaju na osnovu simulacionih transportnih modela (Ahn 1998). Opšti pristup u proceni emisije od drumskom saobraćaja podrazumeva sabiranje proizvoda jedinične emisije i odabranih saobraćajnih promenljivih. Postoji čitav niz emisionih modela za različite prostorne i vremenske uslove. Emisioni modeli mogu se svrstati u tri osnovne grupe: modeli emisionih faktora, modeli prosečne brzine i režimski modeli (Pimentel 2008).

Emisioni modeli se na istim osnovama razvijaju u odnosu na nivo preciznosti izlaznih podataka. Tako se za potrebe procena na nacionalnom ili regionalnom nivou koriste manje detaljni modeli kao što su modeli emisionih faktora vozila. Ovi modeli mogu koristiti podatke iz makroskopskih transportnih modela i to podatke o transportnom radu (pređenim vozilo kilometrima). Makroskopski i mezoskopski transportni modeli mogu da posluže kao osnova saobraćajnih podataka za emisione modele koji se baziraju na prosečnoj brzini. Ovi modeli su precizniji jer se klase emisija ne zavise samo od transportnog rada već i od srednje brzine saobraćajnog toka. Koriste se na nivou urbanih celina. Izvori podataka za formiranje modela emisionih faktora i prosečnih brzina mogu biti merenja na putu. Time se dobijaju podaci koji omogućavaju da se emisije predstavu u pogodnoj jedinici koja je obično g/km (najčešće u toku jednog sata).

Za procenu emisija na manjim prostorima za koje se zahteva veća preciznost koriste detaljniji modeli. Procena se zasniva na svakom pojedinačnom vozilu. Ukupna emisija vozila predstavlja sumu emisija koje vozilo proizvodi u toku kretanja tokom stalne promene brzine. Mikroskopski transportni modeli su dobra osnova za procenu trenutnih emisija vozila jer se kretanje vozila modelira na nivou svake sekunde. Rezultat emisionog modela na ovom nivou je emisija izražena u emitovanoj količini u sekundi. Izvori podataka za formiranje modela trenutnih emisija mogu biti laboratorijska ili dinamometarska merenja i merenja na vozilu u pokretu.

Tipologija emisionih modela zavisi od tretmana zagušenja odnosno od načina vožnje, što je ključni element za izračunavanje emisije. Načini vožnje predstavljaju PV (prostor-vreme) dijagrame kojima se opisuje kako se menja brzina kretanja u toku vožnje. U zavisnosti od načina na koji se u emisionim modelima tretiraju načini vožnje, definisane su tri kategorije modela:

- Načini vožnje su ulazni podatak. U modelima ovog tipa potrebni su podaci o načinima vožnje kao ulaz za određivanje vrednosti emisija za različite klase vozila. To su u osnovi, režimski emisioni modeli koji kombinuju trenutne emisione faktore za svaku klasu vozila sa specifičnom snagom motora ili promenom brzine (Leung & Williams 2000; Zallinger et al. 2005), i sa informacijama o vremenu provedenom u svakom od modova (režima) vožnje po lokaciji.
- Načini vožnje se izvode kao deo procesa modeliranja emisija. U ovim modelima se generišu pojednostavljeni načini vožnje kao funkciju određenog broja makroskopskih saobraćajnih promenljivih (npr. obim saobraćaja, prosečna brzina, gustina saobraćajnog toka) i karakteristika saobraćajne mreže (npr. dužina deonice, broj saobraćajnih traka, brzina slobodnog toka, tip raskrsnice, podešavanje semafora). Generisani načini vožnje se kombinuju ili sa trenutnim emisionim faktorima (g/s) ili se koriste za proračun na osnovu tabela emisionih faktora (g/km) (Lei et al. 2010; Negrenti & Zanini 1999; Matzoros 1990).
- Podaci o načinima vožnje su implementirani tokom razvoja modela. U modelima ovog tipa se podaci o načinima vožnje (u ovom slučaju to su ciklusi vožnje) koriste za razvijanje emisionih faktora zasnovanih na pređenoj razdaljini (g/km). Ovako definisani emisioni faktori su ili konstantni (ako se odnose na celo područje od interesa) ili su u funkciji: od jedne kontinualne promenljive (model prosečne brzine) ili diskretan kvantitativni ili od kvalitativnog opisa saobraćajne situacije (model saobraćajne situacije).

Prva dva tipa su pogodna za analizu promena emisije izduvnih gasova na lokalnom nivou (npr. raskrsnice, male mreže), dok je poslednji tip adekvatniji za primenu na

većim površinama (urbani područja, male zone) koji se najčešće koriste u praksi. Pregledom 58 međunarodnih studija koje se bave primenom modela emisije izduvnih gasova od saobraćaja utvrđeno je da 81% ovih studija koristi emisione modele poslednjeg tipa. U 16% slučajeva primenjen je model prvog, a samo u 3% slučajeva model drugog tipa (Smit 2006).

U osnovi, svi emisioni modeli pri proceni nivoa emisije kombinuju informacije o aktivnosti po klasi vozila (npr. broj pređenih kilometara ili transportni rad) sa emisionim faktorima (emisija po jedinici aktivnosti). Podaci o aktivnosti vozila mogu se dobiti iz statističkih izvora ili kombinovanom upotrebom modela i izmerenih vrednosti o veličini saobraćajnih tokova, a sve funkciji pređenog broja kilometara. Modeli poslednje klase koriste podatke o ukupnom transportnom radu i pojedinačne emisione faktore da bi se proračunale ukupne emisije za datu oblast (npr. ceo grad). Najčešće korišćeni modeli iz poslednje kategorije su modeli prosečne brzina, poput MOBILE (US EPA 2004), COPERT (Kousoulidou et al. 2010; Ntziachristos & Samaras 2010) i drugih koji se redovno primenjuju u praksi (50% od svih modela u kategoriji). U ovim modelima, emisioni faktori su određeni u funkciji od prosečne brzine. Modeli saobraćajnih situacija koriste diskretne emisione faktore za određene saobraćajne situacije, koje mogu biti definisane kao tekstualni opis (INFRAS 2004) ili kao skup kvantitativnih promenljivih.

Prognoza efekata različitih modela vožnje, generalno je ograničena određenim aspektima modeliranja. Emisioni modeli često uzimaju u obzir efekte zagušenja samo za emisije tokom aktivne vožnje (upaljen motor), pretpostavljajući da su emisije izduvnih gasova tokom starta hladnog motora ili praznog hoda, nezavisne od ponašanja vozača. Ipak, to je naznaka da zagušenje značajno utiče na emisije pri hladnom startu i praznom hodu. Slično tome, efekti zagušenja su, često, prognozirani samo za kontrolisane zagađivače, a ne i za ostale, iako se efekti pojedinih fosilnih goriva mogu predvideti indirektno poznavanjem upotrebe pojedinih vrsta fosilnih goriva. Kao posledica toga, efekti zagušenja su samo delimično inkorporirani u prognoze (Smit 2006).

Transportni modeli predstavljaju aproksimaciju stvarnosti i predstavljaju procenu sa određenim nivoom neizvesnosti. To je možda zanemarljivo kada se uzmu u

obzir ciljevi zbog kojih je transportni model prvobitno izgrađen (analiza zagušenja, analiza multi-modalne mreže, analiza saobraćajne mreže, itd), ali za povezivanje sa emisionim modelom je važno da se proceni stepen pouzdanosti saobraćajnih podataka (prosečna brzina, razdaljine, itd) da bi se dobili prihvatljivi rezultati emisija.

#### **2.4 Modeliranje u okviru različitih saobraćajnih podistema (multi-modalno modeliranje)**

Preciznije modeliranje saobraćajnih sistema uslovljava i prelazak sa modeliranja u okviru jednog podistema na tzv. multi-modalno modeliranje. Tradicionalni pristup upravljanja transportnim sistemom je zasnovan na upravljanju u okviru pojedinih načina prevoza i izgradnji infrastrukture. Savremeniji pristup se kreće u pravcu pružanja sveobuhvatnije analize. Postoji potreba za multi-modalnim pristupom koji obuhvata sve načine prevoza.

Raspodela saobraćaja na mreži saobraćajnica ima veći značaj kod putničkih automobila i teretnih vozila, zbog velikog broja vozila. Javlja se potreba da se kroz metode raspodele definiše i ponašanje putnika. Kod javnog prevoza, zahtevi definisani u putovanjima se na osnovu reda vožnje raspodeljuju po vozilima javnog prevoza. Nailazak vozila javnog prevoza je definisan redom vožnje i ne daje mogućnost izbora trase kretanja pa samim tim, ne zahteva kompleksni pristup.

##### *Podsystem putničkih vozila*

Transportni zahtevi u podsystemu putničkih automobila imaju najveći udeo u ukupnim zahtevima koji se ispostavljaju prema transportnom systemu u celini. Tako se ovi zahtevi obično uzimaju kao osnova za određivanje merodavnog zahteva za dimenzionisanje elemenata transportnog sistema. U različitim transportnim sistemima su razvijene različite zakonitosti koje definišu udeo transportnih podistema u ukupnim transportnim zahtevima (raspodela po načinu) kao i procenat transportnih zahteva koji se javlja u karakterističnim periodima u toku dana (vremenska raspodela).

Već je istaknuta važnost kalibrisanja modela i transportnih zahteva koji se koriste za raspodelu na mreži. Kalibracija je naročito bitno u podsystemu putničkih vozila

baš zbog najvećeg učešća ovih vozila u saobraćajnom toku. Proces kalibracije je iterativan u oba svoja segmenta: kalibraciji mreže i kalibraciji transportnih zahteva.

Kod kalibracije mreže kalibracija podrazumeva balansiranje između fizičkih i eksploatacionih karakteristika saobraćajne mreže. Glavni pokazatelj koji objedinjuje sve fizičke i eksploatacione karakteristike je kapacitet saobraćajnice.

Pored kapaciteta, sa fizičke strane bitni su elementi kao što su broj traka, dužina, širina, nagib itd. Od eksploatacionih karakteristika najvažnija je brzina, koja se javlja u formi slobodne brzine, brzine pri kapacitetu, brzine zasićenog toka... Ove karakteristike zajedno utiču na izbor najkraćih staza kao i uključivanje alternativnih staza u raspodeli saobraćaja na mreži. Kalibracija podrazumeva takvo balansiranje elemenata mreže da se omogući da značaj saobraćajnica (deonica) bude što sličniji percepciji vozača koji tu mrežu koriste. Tako da model dobro oponaša izbor trase koji vozači prave.

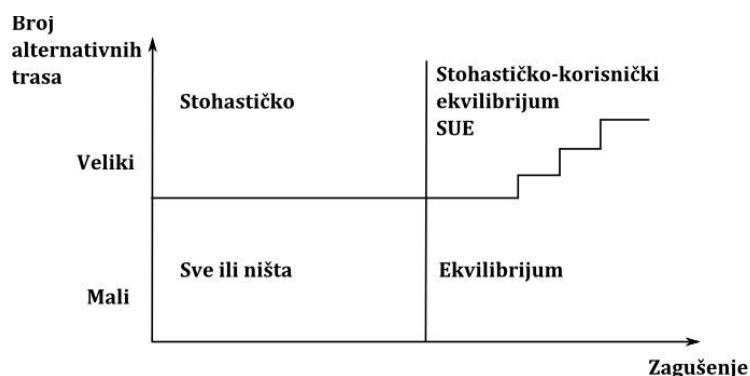
Kalibracija transportnih zahteva podrazumeva promenu elemenata prostorne raspodele sadržane u poljima matrice kretanja. Ukupan broj putovanja se menja kao i ukupne atrakcije i produkcije zona da bi se obezbedili protoci koji su utvrđeni brojanjem saobraćaja. Transportni zahtevi se mogu menjati ali tako da se ne izgubi šablon kretanja koji je dobijen iz anketa.

Za dobijanje protoka na uličnoj mreži na osnovu transportnih zahteva potreban je još jedan segment koji podleže kalibraciji. To je procedura koja se koristi za raspodelu saobraćaja na mreži. Raspodela saobraćaja rezultovaće protocima na svakoj deonici saobraćajne mreže na osnovu definisanih parametara mreže, transportnih zahteva i metode opterećenja. Postoji veliki broj metoda raspodele saobraćaja. Postavlja pitanje koju metodu koristiti. Upotreba određene metode zavisice od raspoložive ulazne baze podataka (I-C matrica), svrhe ispitivanja saobraćajne mreže kao i poznavanja karakteristika mreže i ponašanja putnika (Vukanović 1997).

Metode raspodele saobraćaja po mreži mogu se podeliti na osnovu dva osnovna pristupa:

- Pristup zasnovan na tretmanu odnosa protoka i kapaciteta: metode u kojima ne figuriše kapacitet saobraćajnice i metode u kojima se uzima u obzir kapacitet saobraćajnice. Osnovni razlog kapacitivnih ograničenja je približavanje realnosti, jer je iskorišćenje kapaciteta faktor koji bitno utiče na raspodelu opterećenja, naročito u zagušenim stanjima.
- Pristup zasnovan na osnovnom principu raspodele saobraćaja: metode ravnotežnih i neravnotežnih stanja. Podela je izvršena u odnosu na prvi princip Vordropa koji glasi: "Saobraćaj na mreži se raspoređuje na takav način da su troškovi putovanja na svim mogućim alternativnim trasama između određenog izvora i cilja ekvivalentni, dok su na neiskorišćenim trasama troškovi veći". Praktično ovaj princip podrazumeva da: svi putnici istovetno procenjuju troškove na mreži i opredeljuju se za trasu sa minimalnim troškovima; i da preusmeravanje putnika sa jedne trase na drugu ne bi donelo koristi. Podela na ravnotežna i neravnotežna stanja je funkcionalna i ima zadatak da korisniku olakša sagledavanje upotrebne vrednosti modela (Vukanović 1997). Može se koristiti i raspodela na osnovu drugog principa Vordropa. Ovaj princip se bavi optimalnim stanjem sistema u celini i glasi da je optimum sistema jednak minimumu ukupnih vremena putovanja u sistemu.

Izbor metode opterećenja će zato zavisiti od nivoa zagušenja, od alternativnih pravaca i od nivoa do kog vremenski gubici utiču na izbor trase (Slika 2-4) (DfT 1997).



Slika 2-4. Izbor metode raspodele saobraćaja u zavisnosti od zagušenja i broja alternativnih trasa

Svaka metoda ima svoje specifičnosti i svaka se koristi u zavisnosti od više faktora:

- vremenskog intervala koji opisuje matrica (časovna, dnevna, nedeljna matrica),
- karakteristika transportnog podsistema se simulira,
- vrste saobraćajne mreže (ulična ili putna) i
- ponašanja ljudi, pre svega u smislu izbora trase kretanja.

Vremenski interval će uticati na izbor procedure opterećenja u zavisnosti od toga da li je reč o periodu kada se očekuju zagušenja na saobraćajnoj mreži ili ne. Takozvana, vršna opterećenja karakteriše veće iskorišćenje kapaciteta saobraćajne mreže i veći protoci na alternativnim trasama kretanja vozila. Procedure koje su pogodne za analizu vršnih opterećenja su ekvilibrijum, metoda učenja i stohastičko opterećenje.

Kod vanvršnih opterećenja, manja je popunjenost mreže što uslovljava drugačije ponašanje vozača. Koriste se uglavnom najbrže trase. Samim tim je najpogodnija inkremental metoda. Ova procedura je bitna kod formiranja koridorskog opterećenja, tranzitnih i izvorno-ciljnih putovanja. U slučaju da se dobijaju nerealne trase, bolje rezultate (veći broj opterećenih trasa) može dati metoda učenja.

Raspodela saobraćaja na nivou manjih vremenskih jedinica (manjih o jednog časa) je uslovljena upotrebom dinamičkih metoda raspodele.

Različiti transportni podsistemi svojim specifičnostima utiču na izbor metode opterećenja. Najprostija, inkremental metoda, pokazala se kao pogodna za raspodelu saobraćaja teretnih vozila, kao i za opterećenje putne mreže. Sve ostale metode su pogodne za opterećenje saobraćajne mreže putničkim automobilima, a izbor zavisi od toga koja metoda najbolje opisuje podsistem na osnovu poslednjeg kriterijuma, izbora trase. Razlika između metoda se ogleda u broju iskorišćenih alternativnih trasa. Izbor metode ne može biti napravljen unapred već se mora probati sa više procedura i onda utvrditi koja najbolje odgovara realnom stanju na terenu. Do rešenja se dolazi kroz iterativni postupak kalibracije saobraćajne mreže



i opterećenja koji za krajnji cilj ima odabir procedure koja će na najrealniji način opisivati ponašanje vozača u simuliranom sistemu.

Potrebno je definisati određene kriterijume koji će istovremeno služiti kao mera kvaliteta kalibracije i kao kriterijum za prekid procesa kalibracije.

Kvalitet kalibracije se može konstatovati na više načina, a izdvajaju se tri postupka koja su veoma često u upotrebi (DfT 1996; DfT 1997):

- korelaciona analiza,
- statistička analiza indeksa GEH i
- statistička analiza dozvoljenih odstupanja u zavisnosti od obima saobraćaja

#### *Podsistem teretnih vozila*

Struktura saobraćajnog toka utiče na eksploatacione karakteristike saobraćajnog toka. Jak uticaj imaju vozila koja svojim dimenzijama i težinom značajno odstupaju od gabarita putničkih vozila koja su dominantna u saobraćajnom toku. Efekat gabaritnih vozila u saobraćajnom toku je znatno izraženiji u urbanim sredinama.

U slučaju kada je modeliranje saobraćajnih tokova teretnih vozila samo mali deo šireg planerskog postupka koja obuhvata više vidova saobraćaja, moraju se razmotriti prioriteti. Nivo napora, utrošenih na teretni saobraćaj bi trebalo da bude proporcionalan važnosti u ukupnom poslu, kao i potencijalnom doprinosu ukupnoj preciznosti (ukoliko je učešće 10% u saobraćaju području nema smisla utrošiti 50% napora u analizi). Zadatak je dobiti kvalitetne rezultate i biti efikasan (FHA 1996).

U urbanim sredinama u saobraćajnom toku se pojavljuju dostavna vozila i vozila javnog prevoza putnika. Vozila masovnog prevoza putnika u gradu obično imaju bolje dinamičke karakteristike upravo da ne bi značajno uticala na parametre saobraćajnog toka. Na vangradskoj mreži se javljaju i teretna vozila i autobusi koji obavljaju funkciju daljinskog prevoza putnika.

Urbane sredine treba da budu atraktivne za stanovanje, rad i rekreaciju. Ozbiljna konkurencija ovim funkcijama je snabdevanje. Osnovna dilema vezana za snabdevanje u centralnim gradskim zonama ostaje: efikasnost snabdevanja

centralne zone zavisice od konfliktnih tacaka zone (uskim grlima na saobraćajnoj mreži usled fizičkih ograničenja ili saobraćajnih zagušenja).

S druge strane urbani planeri su svesni potrebe da se ekološka slika centralne zone poboljša, da se privuku kupci, radnici pa čak i stanovnici (Allen et al. 2006).

Pored pozitivnih efekata na održavanje industrijskih i trgovačkih aktivnosti na određenom nivou i zapošljavanja velikog broja ljudi, transport tereta stvara i negativne ekonomske, ekološke i društvene uticaje. To su :

- Ekonomski uticaji: zagušenja, neefikasnost i trošenje resursa
- Ekološki uticaji: Emisija zagađivača uključujući i ugljen-dioksid (primarni gas koji stvara efekat staklene bašte), upotreba fosilnog goriva koje se ne može obnovljati, zemljište i energija, otpad (pneumatici, ulje i drugi materijali)
- Uticaji na stanovništvo: posledice zagađenja na zdravlje (smrt, bolesti), povrede i smrt kao posledica saobraćajnih nezgoda, buka, vizuelne smetnje i drugi uticaji (uključujući i sve manje zelenila i otvorenog prostora u gradovima kao posledica gradnje saobraćajne infrastrukture)

Vozila za snabdevanje veoma utiču na probleme zagušenja, zagađenja, bezbednosti i buke. Stoga nije neobičan konflikt između komercijalnih i ekoloških interesa.

Tipovi i šeme kretanja teretnih vozila će zavisiti od velikog broja faktora (Jovanović 1990; Jović 1996):

- Tip i lokacija industrijskih objekata
- Struktura lanaca snabdevanja kompanija u okviru pomenutih industrija
- Postojeća saobraćajna infrastruktura uključujući i postojanje aerodroma, luke i robnih terminala
- Lokacija i veličina skladišnih objekata
- Veličine i nosivosti vozila koja mogu da rade u urbanoj sredini
- Regulatorna vezana za pristup i manipulaciju u gradu
- Postojeće stanje podsistema transporta tereta i saobraćajnog sistema u celini

- Ponašanje korisnika (upotreba on-line naručivanja robe koja se isporučuje teretnim vozilima...)

Kretanja teretnih vozila po uličnoj mreži su uglavnom uslovljena vremenskim ili prostornim ograničenjima. Zato je modeliranje ovih tokova uglavnom prostije od podsistema putničkih vozila, s obzirom da je na raspolaganju manji broj alternativnih trasa pa se samim tim i koriste prostije metode raspodele saobraćaja na mreži. Ipak, u pogledu određivanja transportnih zahteva nema razlike u odnosu na druge podsisteme.

Osnovni generatori tokova teretnih vozila su gradovi i industrijski objekti u urbanim i ruralnim sredinama. Kod modeliranja saobraćajnih tokova teretnih vozila, važno je razumeti:

- prirodu teretnog podsistema na području;
- željenu upotrebu (namenu) samih prognoza;
- dostupnost i kvalitet podataka; i
- potrebna preciznost, imajući u vidu odnos između prognoze tereta i prognoze putnika.

Do podataka o karakteristikama robnih tokova se može doći iz velikog broja izvora. Osnovna istraživanja važna u planerskom smislu mogu biti istraživanja robnih tokova, istraživanja lokacija, namene površina i ankete domaćinstava, istraživanja kretanja vozila (uključujući i anketa vozača), namena površina kao ulaz za modeliranje, istraživanja kod utovarivača, istraživanja kod primalaca, utvrđivanje podataka o vozilima za snabdevanje, brojanja saobraćaja, informatički podaci o teretu (sa kamera, senzora i drugih uređaja za automatsko registrovanje podataka), podaci o teretu koji dolazi u gradsko područje drugim vidovima transporta i sl.

Modeliranje predstavlja validan način da se na osnovu strukture saobraćajnog toka, odnosno broja teretnih vozila na saobraćajnoj mreži utvrđenog brojanjima saobraćaja, utvrde transportni zahtevi ovog vida prevoza.

*Podsistem javnog masovnog transporta putnika*

Najveći broj kretanja u vršnom satu i na nivou celog dana u razvijenim saobraćajnim sistemima se obično obavlja javnim prevozom. Za američke gradove je karakteristično da je dosta manje učešće javnog prevoza u ukupnom transportnom radu dok većina velikih evropskih gradova u većoj ili manjoj meri koristi javni prevoz kao primarni transportni podsystem.

Transportni zahtevi u podsystemu javnog masovnog prevoza su podložniji promenama u odnosu na zahteve drugih transportnih sistema (PA i teretna vozila). Transportni zahtevi su blisko povezana sa transportnom ponudom. Svaka promena transportnih zahteva utiče na potrebu da usklađivanja ponude. S druge strane, svaka promena ponude utiče na promenu karakteristika zahteve. Transportni zahtev može po količini ostati nepromenjen ali se ponuda podsystema konstantno menja sa ciljem da se poboljša rad. Ponuda u podsystemima putničkih i teretnih vozila je definisana kroz kapacitete saobraćajnica, čija promena zahteva određeno vreme (bilo da je reč o građevinskim ili režimskim merama). Kod javnog prevoza promene ponude su definisane kroz promene u redu vožnje koje mogu biti realizovane i na nedeljnom nivou. Posledično dolazi do brže promena u razlivanju putovanja po saobraćajnoj mreži u odnosu na putnička i teretna vozila koja pokazuju izvesnu konstantnost u kraćim vremenskim periodima.

Osnovna jedinica transportnih zahteva je putovanje, dok je ponuda definisana redom vožnje. Matrica kretanja je uglavnom po obimu kretanja dosta veća od matrice npr. putničkih automobila. Javni prevoz podrazumeva kalibraciju podsystema prevoza u odnosu na zahteve tako da se realno odslikava ponašanje podsystema i putnika.

Kalibracija podsystema javnog prevoza će pre svega zavisiti od veličine grada i razvijenosti podsystema i podrazumeva rad sa većim brojem alternativa, po pitanju mesta uključenja u podsystem i promene vrste prevoza. U postojećem stanju, poenta je u kalibraciji linija i prostoje kalibraciji na osnovu nekog globalnog pokazatelja (ukupan broj putnika itd). Kod prognoze, potrebno je na osnovu planiranog razvoja usaglasiti ponudu i potražnju. Zato je akcenat kod modeliranja u javnom prevozu na simultanom modeliranju ponude i potražnje.

Osnovne razlike u raspodeli saobraćaja u podsystemu javnog prevoza su u većem broju putovanja na mrežu i manjem obimu mreže, s obzirom da je to samo mreža koja je definisana trasama linija. Putovanja iz matrice transportnih zahteva mogu biti raspodeljena samo na definisanim linijama. Metode raspodele saobraćaja se zasnivaju na srednjem intervalu sleđenja vozila na linijama ili definisanim redom vožnje. Pri raspodeli će presudan uticaj na odabir linije imati otpor kretanju koji predstavlja težinsku kombinaciju vremenskih gubitaka: terminalna pešačenja, čekanje na prevoz, vreme vožnje, vremena ulaska i izlaska, vreme čekanja na presedanje itd. Specifičnost modeliranja javnog prevoza su lokacije (stajališta) definisana kao jaka presedačka mesta. Na ovim mestima je omogućena komunikacija na nivou transportnih podsystema kao i linija u okviru istog podsystema.

Specifičnost kalibracije podsystema javnog prevoza se ogleda u čestim promenama u radu sistema (promene redova vožnje). Njihova učestalost je znatno veća u odnosu na ostale transportne podsysteme, ali su i posledice na kapacitet kvantitativno znatno manje. Svaka promena, bilo da je reč o promeni trase linije, novom stajalištu ili promeni reda vožnje uticaće na ukupni ponuđeni kapacitet i raspodelu opterećenja. Takve promene su, s druge strane, veoma česte i uslovljene konstantnim prilagođavanjem podsystema potrebama putnika.

Kalibracija matrica je u funkciji dobijanja realnog ukupnog broja putovanja i odgovarajuće prostorne raspodele kretanja. Kalibracija matrica je iterativni postupak koji korišćenjem raspodele kretanja na kalibrisanoj mreži JP-a treba da da protoke na linijama javnog prevoza u skladu sa vrednostima dobijenim iz sprovedenih istraživanja. [Vuk, 2006 i 2006].

Sistematizovani i iskontrolisani rezultati se primenjuju za kalibraciju matrica, odnosno za modeliranje transportnih zahteva ali je potrebno voditi računa i o istorijskim podacima i trendovima vezanim za pokazatelje u javnom prevozu.

Kalibracija matrica se radi u više nivoa i različiti podaci se koriste za svaki nivo. Kalibracija matrica na nivou ukupnog broja putovanja predstavlja grubu proveru. Na osnovu trenda promene broja putnika koji koriste javni prevoz, a imajući u vidu promene u transportnom podsystemu javnog prevoza može se napraviti procena

ukupnog broja putovanja. Provera logičnosti procenjenih vrednosti je najlakša kroz transportni model da bi se pre bilo kakve kalibracije dobila koridorska opterećenja koja redom veličina opterećenja odgovaraju vrednostima dobijenim istraživanjima [Jović, 2008].

Matrice kretanja javnim prevozom su po ukupnom broju kretanja veća od matrica koje predstavljaju putnička ili teretna vozila pa samim tim i sa većim brojem popunjenih polja matrice. Tako problem koji se javlja kod kalibracije matrica putničkih vozila ovde ima manji značaj. Specifičnosti javnog prevoza koje su vezi sa učestanošću promena u sistemu uslovljavaju potrebu za definisanjem pokazatelje na osnovu kojih će se ocenjivati logičnost rezultata i kvantifikovati odnosi koji vladaju u podsistemu javnog prevoza. To podrazumeva sistemsku analizu na više nivoa; počevši od pokazatelja na nivou celog sistema i celog područja, pokazatelja vezanim za različite transportne podsisteme i različite delove područja, do pokazatelja vezanih za učešće određenih linija okviru transportnih podsistema i manjih prostornih jedinica.

Na sistemskom nivou i nivou celokupnog područja mogu se koristiti sledeći pokazatelji:

- Ukupan broj ostvarenih vožnji
- Ukupan transportni rad u podsistemu JMTP
- Ukupno vreme transporta u podsistemu JMTP

Mogu se definisati i neki specifični pokazatelji koji su izvedeni na osnovu sistemskih pokazatelja. Ukupan broj ostvarenih vožnji može da na osnovu broja presedanja omogući definisanje koeficijenta presedanja. Koeficijent presedanja predstavlja prosečan broj presedanja koji se ostvari u toku jednog putovanja od izvora do cilja.

Na nivou podsistema i delova grada:

- Ukupan broj ostvarenih vožnji po transportnim podsistemima
- Ukupan transportni rad po podsistemima JMTP i njihov međusobni odnos
- Ukupno vreme transporta po podsistemima JMTP i njihov međusobni odnos
- Ostvarena presedanja između podsistema JMTP

- Razmena između delova grada, pre svega, na skrin linijama i na važnijim gradskim magistralama

Na nivou linija i manjih prostornih jedinica:

- Analiza transportnog opterećenja linija
- Analiza odnosa opterećenja među linijama
- Analiza linija sa aspekta ulaza, izlaza i protoka putnika po stajalištima, vremena putovanja, ponuđenog i popunjenog kapaciteta između stajališta

Neophodni elementi za početak analize na osnovu simulacije su: postojeća mreža linija i koncept razvoja javnog prevoza, elementi rada linija svih podsistema, matrice prostorne raspodele putovanja i procedure raspodele saobraćaja.

## **2.5 Upotrebna vrednost modelskog pristupa**

U radu koji je objavljen u časopisu Transport (Jovic & Djoric 2010) ukazuje se na značaj prethodne analize i ocena efekata planskih mera multi-modalnim modeliranjem i ističu uštede u odnosu na „slepu“ implementaciju upravljačkih mera. Modelirani su transportni zahtevi u podsistemima putničkih i teretnih vozila u postojećem stanju, definisani trendovi kretanja relevantnih pokazatelja sistema i kvantifikovan uticaj na transportne zahteve, kao osnovnog parametra koji određuje negativan uticaj saobraćaja. Rad ističe da rešavanje konkretnog problema nekada može samo da vremenski ili prostorno dislocira problem. Problem istog ili većeg intenziteta može se pojaviti u drugom vremenskom periodu ili na drugom delu saobraćajne mreže.

Primarno u rešavanju problema u transportnom sistemu je formiranje jedinstvene baze podataka čiji je cilj obezbeđivanje dobre osnove (modela postojećeg stanja) za modeliranje, prognozu, kvantifikaciju i testiranje varijanti budućeg razvoja. Transportni model je upravo osnova za ovakve analize (Jovic 2004; Jović 2007). Pored saobraćajnih kriterijuma u modeliranju sve su značajniji i kriterijumi uticaja na životnu sredinu u vezi sa emisijom buke i štetnih gasova u atmosferu (Jovic & Djoric 2009).

Model ulične mreže je obuhvatao i efekte značajnih projekata u Beogradu, završetka obilaznice oko Beograda i izgradnju mosta preko reke Save (most na

Adi). Zajednički cilj ova dva projekta je značajno rasterećenja saobraćajne mreže, naročito gradskog autoputa (deo koridora X) kroz premeštanjem tranzitnih tokova teških teretnih vozila na obilaznicu i pružanje alternative pri prelasku preko Save razvojem magistralnog poluprstena (UMP).

Ovakav plan razvoja infrastrukture inicirao je ideju da se modelira i analizira raspodelu saobraćaja na mreži u zoni alternativnih prelaza (gradski autoput i novi savski most) za više varijanti rešenja i da se izvrši osnovna analiza uticaja na životnu sredinu. Varijantna rešenja su generisana na osnovu regulativnih mera koje su definisane različitim ograničenjima brzina na alternativnim trasama.

Modeliranje je sprovedeno kroz nekoliko koraka:

- Kodiranje saobraćajne mreže
- Definisane zakonitosti promene brzine u odnosu na iskorišćenje kapaciteta (VD funkcije)
- Raspodela saobraćaja na mreži
- Analiza raspodele saobraćaja na mreži (protoka)
- Analiza uticaja na životnu sredinu (buke i emisije gasova)

U radu je korišćen model za procenu uticaja saobraćaja na buku i emisiju gasova koji je razvijen za područje druge države (Nemačke i Švajcarske). Korišćenje ovakvih modela je moguće samo za relativno poređenje varijanti, ne i za apsolutnu procenu emisija. To je i glavni nedostatak korišćenja modela koji su razvijeni za druga područja.

U radu koji je objavljen u časopisu *Thermal Science* (Jovic & Djoric 2009) iskorišćen je isti saobraćajni model kao i u prethodnom radu (objavljenom u časopisu *Transport*). Za potrebe analize izdvojena su dva scenarija sa različitim ograničenjima brzine gde se kao posledica javljaju različiti protoci na posmatranoj uličnoj mreži. Razlike u raspodeli saobraćaja uslovljavaju i razlike u emisijama buke i gasova.

U radu su na nivou deonica saobraćajne mreže definisane emisije buke i gasa. Za to je korišćen model za procenu koji je razvijen za drugo područje (Nemačke i Švajcarske). Izvršena je uporedna analiza po odabranim scenarijima sa detaljnom



analizom efekata u apsolutnom i relativnom smislu. Promene u emisijama na deonicama mreže dovele su do zaključka da rešenja koja su u saobraćajnom smislu optimalna mogu imati nepovoljniji efekat na životnu sredinu. Presudan faktor uticaja na emisije je brzina saobraćajnog toka kao faktor koji jedini figurira u modelu za procenu.

Izvedeni zaključci su prihvaćeni jer je emisioni model razvijen na bazi empirijskih istraživanja. Što znači da je mehanizam promene emisije dobro opisan, a razlika u apsolutnim vrednostima emisija je u funkciji sastava voznog parka. Time se ističe mogućnost korišćenja u relativnom rangiranju varijanti i nepouzdanost apsolutnih procena emisija za studiju slučaja.

U radu objavljenom u časopisu *International Journal of Sustainable Transportation* (Basaric et al. n.d.) je predstavljena metodologija za definisanje optimalnog odnosa učešća putničkog automobila i javnog prevoza u vidovnoj raspodeli. Takav odnos je rezultat mera transportne politike i njime se ostvaruje smanjenje negativnog uticaj na životnu sredinu i društvenih troškova. Mere transportne politike se oslanjaju na upravljanje mobilnošću kroz rigidne i „soft“ mere. Rigidne mere su mere kojima se direktno utiče na oblikovanje transportnim zahtevima (kao razne mere politike cena u saobraćajnom sistemu) dok su „soft“ mere iz oblasti promene stavova korisnika, kampanja i marketinga.

Transportni model je iskorišćen za modeliranje efekata mera transportne politike na raspodelu saobraćaja na uličnoj mreži Novog Sada. Rezultati raspodele saobraćaja su iskorišćeni za definisanje:

- Emisija gasova u različitim uslovima upravljanja transportnim sistemom (transportna politika). Za procenu emisija su korišćene relacije definisane u Evropskoj agenciji za životnu sredinu (EEPA) u okviru razvoja COPERT modela. Procenjene su emisije CO, VOC, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> i PM korišćenjem protoka i brzina kao rezultata modeliranja. Zbog karakteristika emisija CO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub> procena količina ovih zagađivača je izvedena na osnovu transportnog rada, korišćenjem prosečne potrošnje goriva i odgovarajućih emisionih faktora.

- „Short-run“ eksternih troškova, što su troškovi koji su relevantni za postojeću infrastrukturu (bez investicionih ulaganja). U okviru eksternih troškova procenjeni su troškovi zagušenja (troškovi vremena), saobraćajnih nezgoda, zagađenja vazduha, zagađenja vode i zemljišta, buke i klimatskih promena. Modelske brzine i protoci su korišćeni za procenu troškova zagušenja, zagađenja vazduha i klimatskih promena dok je transportni rad korišćen za procenu troškova buke, saobraćajnih nezgoda i zagađenja zemljišta i vode.

Rezultati rada omogućavaju razvoj strategije održivog upravljanja gradom kroz definisanje mera transportne politike koji će imati željeni rezultat. Modelski pristup omogućava definisanje željenog saobraćajnog stanja i generisanje ulaznog seta podataka za procenu emisija i eksternih troškova.

Rad je značajan jer definiše novi način za procenu emisija i eksternih troškova koji se zasniva na dostupnim podacima. Ovo je naročito bitno u našim uslovima kada postoji problem sa prikupljanjem potrebnih podataka. U radu su definisani alternativni izvori podataka koji se mogu koristiti za primenu metodologije.

Rad prezentovan na konferenciji REACT je predstavio primenu modelskog pristupa u definisanju koncepta razvoja održivog transportnog sistema. Takav koncept podrazumeva da se razvoj zasniva na primarnoj ulozi šinskih transportnih podсистema. Duž pravaca na kojima je planiran kapacitivni šinski podsystem, nema izražene konkurencije ostalih podсистema sa manjom prevoznom sposobnošću. Na ostalim pravcima, tramvaj predstavlja nosioca prevoza uz ograničenu konkurenciju autobusnog vida prevoza. Trolejbuski i autobuski podsystemi imaju distributivnu ulogu u gradskim celinama u kojima ne postoje šinski gradski sistemi dok gravitacionom području šinskog sistema imaju napojnu ulogu.

Transportni model javnog prevoza je baza podataka koja objedinjuje podatke o transportnoj ponudi i potražnji u podsystemu masovnog transporta putnika. U definisanju i analizi koncepta razvoja ovog podсистema prognozirani su budući transportni zahtevi i definisane promene u podsystemu po etapama uvođenja kapacitivni šinski podsystem. To je zahtevalo ukidanje i dodavanje linija, kao i

skraćivanje i produžavanje u skladu sa konceptom razvoja. Sve promene su testirane u iterativnom procesu na osnovu promena na nivou:

- Celog sistem javnog masovnog prevoza putnika. Osnovni kontrolni pokazatelj je ukupan broj vožnji u sistemu kao i broj presedanja u sistemu.
- Podсистема (tramvajski, autobuski...). Kontrolisan je broj vožnji u svakom podсистemu i njihov međusobni odnos i razmena putnika.
- Linija (u okviru svakog podсистема). Kontrolni pokazatelji su ostvareni broj vožnji po svakoj liniji i njihov značaj u okviru sistema, kao i razmena putnika između linija na jakim presedačkim lokacijama.

Elementi na različitim nivoima su u tesnoj vezi, tako da promena jednog utiče na sve ostale u vertikalnoj hijerarhiji.

U radu je prikazano kako modelski pristup omogućava definisanje koncepta razvoja složenog sistema (kao što je sistem JMTP). Definisani su i verifikovani kroz studiju slučaja pokazatelji kvaliteta predloženog rešenja. Istaknuta je neophodnost dobrog poznavanje modeliranog problema, dobra informaciona osnova i softver za modeliranje.

### 3 Pregled literature

Izvori emisije zagađivača vazduha su kategorisani u pet glavnih izvora:

- stanovanje: stacionarni izvori,
- proizvodnja električne i toplotne energije (elektrane i toplane)
- stacionarno sagorevanje goriva (proizvodnja, industrija i građevina),
- proizvodnja čelika i gvožđa i
- drumski saobraćaj.

Saobraćaj predstavlja glavnih antropogeni izvor za šest osnovnih zagađujućih materija u vazduhu. Grupu osnovnih zagađivača čine: azotovi oksidi ( $\text{NO}_x$ ), nemetanska ispariva organska jedinjenja (NMVOC ili HC), ugljen monoksid (CO), partikularne čestice (PM10 i PM2.5) i olovo (Pb) (EEA 2012c).

Glavni zagađivači koji nastaju usled tipičnog rada motora su ugljen-monoksid, ugljovodonici i oksidi azota. Ugljen monoksid (CO) je proizvod nepotpunog sagorevanja, bezbojan, bez mirisa i veoma otrovan gas. CO smanjuje protok kiseonika u krvotoku i štetan je za svaki živi organizam. U urbanim sredinama motorna vozila doprinose ukupnoj emisiji ugljen-monoksida sa preko 90% (EEA 2012b). Drumski transport učestvuje sa 29% u ukupnoj emisiji CO u Evropi (EEA 2012a; EEA 2012b).

Ugljovodonici (HC) su takođe rezultat nepotpunog sagorevanja u motoru. Oni reaguju sa azotovim oksidima i sunčevom svetlošću u formiranju prizemnog ozona, koji je glavna komponenta smoga. Ozon je jedan od osnovnih zagađivača i izaziva iritaciju očiju, oštećenja pluća i negativno utiče ljudski respiratorni sistem. Ugljovodonici koje emituju motorna vozila su toksični i dugoročno utiču na izazivanje kancerogenih oboljenja. U ukupnoj emisiji HC u Evropi, drumski transport učestvuje sa 16% (EEA 2006; EEA 2012a; EEA 2012b).

Dok su CO i HC proizvodi nepotpunog sagorevanja motornih goriva, oksidi azota ( $\text{NO}_x$ ) se formiraju na drugi način.  $\text{NO}_x$  nastaje reakcijom azota i atoma kiseonika pod uticajem visokog pritiska i temperature tj. u hemijskim procesima koji se dešavaju tokom sagorevanja.  $\text{NO}_x$  takođe dovodi do stvaranja ozona i doprinosi

formiranju kiselih kiša. Drumski transport učestvuje sa 42% u ukupnoj emisiji NO<sub>x</sub> (EEA 2012c; EEA 2006; EEA 2012b).

Najviši nivoi CO i HC se proizvode kada je smeša koja se sagoreva u motoru vozila bogata gorivom, dok se najviši nivoi NO<sub>x</sub> emituju kada je smeša bogata vazduhom. Uslovi kada dolazi do sagorevanja smeše bogate gorivom se javljaju tokom rada u režimu hladnog starta ili pod većim opterećenjem motora, kao što je slučaj za vreme intenzivnih ubrzanja, pri visokim brzinama i na strmim usponima. Visoki nivoi CO i HC se stvaraju pri zagušenjima i u uslovima velikih gustina saobraćajnog toka (Ahn 1998).

Partikularne čestice (PM) su veoma važan zagađivač zbog toga što manje čestice (PM<sub>2.5</sub>) ulaze direktno u čovekov organizam putem respiratornih organa. U ukupnoj emisiji PM drumski transport učestvuje sa oko 16% na nivou Evrope. (Djordjevic et al. 2005; EEA 2012a).

Olovo je najvažniji zagađivač iz grupe teških metala. Unosi se u organizam respiratornim putem, a jednom uneseno u organizam u njemu i ostaje. Velike količine dovode do trovanja (Djordjevic et al. 2005). Drumski transport u Evropi učestvuje u ukupnoj emisiji olova sa 10% što je posledica aditiva na bazi olova koji se dodaju gorivu (EEA 2012c; EEA 2012a; EEA 2012b).

Većina emisija se generiše u procesu sagorevanja i isparavanja samog goriva. Benzini i dizel goriva su po sastavu ugljovodonici. U savršenom sagorevanju sav vodonik iz goriva se pretvara u vodu, a ugljenik se pretvara u ugljen-dioksida. Nažalost, savršen proces sagorevanja je nemoguće postići u realnim uslovima u saobraćajnom toku, a mnogi zagađivači su rezultat (nus-proizvod) ovog procesa sagorevanja kao i isparavanja goriva.

U periodu od 1990. do 2010. godine beleži se pad emisija osnovnih zagađivača na nivou Evrope. Emisije tri osnovna zagađivača koja utiču na stvaranje prizemnog ozona su u značajnom padu: CO za 62%, NMVOC za 56% i NO<sub>x</sub> za 47%. Navedena smanjenja su primarno rezultat smanjenja emisija motornih vozila usled tehničkih unapređenja. U istom periodu, zabeležen je značajan pad emisije olova od 89%, kao i emisije partikularnih čestica od 48% (EEA 2012b). U 2010. godini smanjene

su emisije svih zagađivača vazduha koji su posledica saobraćaja, sem NO<sub>x</sub>. Smanjenja se kreću u rasponu od 2.5 do 10%. I pored opadajućeg trenda, saobraćaj značajno utiče na kvalitet vazduha u urbanim sredinama. Prosečne godišnje vrednosti emisija NO<sub>x</sub> u evropskim gradovima su bile prekoračene u 44% slučajeva (EEA 2011; EEA 2012a).

U periodu od 1990. do 2009. godine u Srbiji su emisije svih zagađivača u porastu, sem CO i NMVOC. Vrednosti emisija od saobraćaja su znatno veće u odnosu na zemlje evropske unije i prisutan je rastući trend. Samo emisije CO i NMVOC su na nivou bliskom 1990. godini (Kecman et al. 2012).

Kvantifikovanje doprinosa saobraćaja ukupnoj emisiji se modelira. Za primenu u realnim uslovima modeli moraju biti zasnovan na merenjima emisija. Merenja su temelj razumevanja emisija, ali primena matematičkog i fizičkog modeliranja je od sve većeg značaja u upravljanju aerozagađenjem (Fenger 1999).

### **3.1 Uticajni faktori na emisiju vozila**

Emisije zagađujućih materija motornih vozila na nivou voznih parkova ili prostornom nivou (grada ili regiona) zavise od broja putovanja i dužina pojedinačnih putovanja, uslova u saobraćajnom toku i tehničko-eksploatacionih karakteristika vozila. Karakteristike kretanja (broj putovanja i prostorna raspodela i dr.) su reprezent aktivnost vozila odnosno aktivnosti voznog parka. Veliki broj vozila i ostvareni transportni rad su razlog što putnički automobili imaju veliko učešće u ukupnoj emisiji zagađivača. Emisije vozila koja ostvaruju podjednak transportni rad razlikovaće se od uslova saobraćajnog toka i tehničko-eksploatacionih karakteristika vozila.

Uslovi u saobraćajnom toku su pod stalnim uticajem međusobnog odnosa protoka, brzine i gustine saobraćajnog toka. Na promene ova tri eksploataciona pokazatelja utiče način regulisanja i upravljanja saobraćajem.

Sa druge strane, emisija pojedinačnih motornih vozila zavisi od velikog broja faktora koji se mogu grupisati u četiri kategorije (Ross et al. 1995; Den Braven et al. 2012):

- stanje u kome se vozilo nalazi pri radu (hladan ili zagrejan motor)

- eksploatacioni faktori u vezi sa načinom na koji se vozilo koristi
- tehnički faktori povezani sa konstrukcijom vozila i
- ambijentalni uslovi

Emisije u različitim stanjima u kojima se vozilo nalazi su rezultat sagorevanja i isparavanja goriva. Emisije vozila pri svakom putovanju variraju u zavisnosti od učešća različitih stanja rada vozila. Nakon startovanja vozila koje nije radilo određeno vreme, radi u uslovima tzv. hladnog starta. To je vreme rada vozila do dostizanja toplog tj. stabilnog režima rada. Režim stabilnog rada je najduže stanje u kome vozilo radi. Emisije nisu samo u vezi sa vožnjom već postoji i isparavanje goriva kada je motor i dalje topao po gašenju motora i dnevne emisije isparavanja iz rezervoara dok je vozilo u stanju mirovanja. U procesu rada motora, emituju se ispariva organska jedinjenja (VOC), CO, NO<sub>x</sub>, i CO<sub>2</sub> dok u procesu isparavanja nastaju samo VOC (Grant 1998; Den Braven et al. 2012).

Od tehničkih karakteristika po važnosti se ističu:

- Tip motora – dizel motori emituju manje CO, VOC i NO<sub>x</sub> ali više partikularnih čestica (Barth et al. 1996)
- Zapremina motora (kapacitet)
- Uređaji za redukciju emisije – emisija zagađenja može se umanjiti uvođenjem uređaja kao što su katalizatori i uređaji za sakupljanje čestica zagađenja. Katalizator uklanja CO i HC, kao i NO<sub>x</sub> iz izduvnih gasova, nakon što napusti motor. Uređaji za sakupljanje čestica zagađenja se koriste za vozila sa dizel motorima za uklanjanje čestica izduvnih gasova (Grant 1998).
- Starost i pređena kilometraža vozila - starija vozila uglavnom imaju više nivoe emisije (Institut saobraćajnog Fakulteta/ISF 2010).

### **3.1.1 Uticaj uslova u saobraćanom toku na emisije**

Osnovni pokazatelj uslova u saobraćanom toku koji se koristi u modeliranju emisije saobraćanog toka je brzina. Brzina se može posmatrati u obliku:

- Prosečne brzine - prosečna brzina putovanja je najčešće korišćen faktor u proceni emisija. Međutim, mogu postojati značajne razlike u emisijama za cikluse vožnje sa približno istim prosečnim brzinama (Joumard et al. 1995).
- Trenutne brzina i ubrzanje. Ubrzanje predstavlja promenu trenutne brzine. Doprinos ubrzanja količini emisija vozila je značajan faktor usled dodatne snage koja se zahteva od motora koji prelazi u rad sa obogaćenom smešom. Step en ubrzanja će uticati na step en povećanja emisije. Tako su povećane emisije karakteristične za raskrsnice kontrolisane svetlosnim signalima, gde su česte pojave zaustavljanja i ponovnih kretanja. Emisija je povećana u prekinutim saobraćajnim tokovima, gde su vozila u modu stani/kreni i gde se javljaju češća ubrzanja i usporenja u vožnji (M. C. Coelho et al. 2009).
- Režima vožnje zavisnih od promene brzine - emisija vozila se razlikuju u različitim režimima vožnje, pri konstantnoj brzini, ubrzanju ili usporenju (Cernuschi et al. 1995). U prelaznim stanjima (na primer između ubrzanja i usporenja) su generalno više emisije u odnosu na konstantne uslove u saobraćajnom toku (de Haan & Keller 2000). Emisija je veća u blizini raskrsnice nego na samoj raskrsnici (Matzoros 1990).

Brzina predstavlja osnovni pokazatelj uslova u saobraćajnom toku. Uslovi u saobraćajnom toku, pa samim tim i brzina, su pod snažnim uticajem regulativnih i upravljačkih mera. Tako će uslovi u toku zavisiti od broja ukrštanja, ograničenja brzine, načina regulisanja, postojanja koordinacije itd.

Pod različitim uslovima u saobraćajnom toku za isto vozilo, emisije variraju u zavisnosti od brzine i ubrzanja. Na veoma visokim ubrzanjima, vozila sa pogonom na benzin troše više goriva nego što može da se sagori i više nego što može da se oksidiše u katalizatoru. Dobijene emisije CO i HC su izuzetno visoke, možda stotine puta veće nego u normalnim radnim uslovima (Barth et al. 1996). Pored brzine i ubrzanja, opterećenje motora vozila je značajan faktor koji doprinosi nivou emisija.

Različiti načini upravljanja svetlosnim signalima na raskrsnicama imaju značajan uticaj na emisije saobraćajnog toka. Koordinirani rad svetlosnih signala na uličnim koridorima će uticati na smanjenje emisija aero-zagađivača. Redukcija zagađenja iznosi od 10 do 40%, sa maksimalnim vrednostima koje se postižu u najpovoljnijim



uslovima saobraćajnog toka (De Coensel et al. 2012). Uvođenjem koordinacije rada svetlosnih signala tipa zelenog talasa prema istraživanju (Madireddy et al. 2011), ostvaruje se redukcija emisije CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> za 10%. S druge strane, ova upravljačka mera utiče na smanjenje vremena putovanja i poboljšanje uslova u saobraćajnom toku, pa se mogu indukovati novi transportni zahtevi.

Način rada svetlosnih signala koji ostvaruje redukciju broja vozača koji krše ograničenje brzine utiče na smanjenje ukupne emisije. Uticaj upravljanja svetlosnim signalima na ponašanje vozača, uključujući redukciju brzine kretanja takođe ima efekat smanjenja emisije (Coelho et al. 2005). Smanjenje brzine kretanja sa 50 na 30 km/h u stambenim zonama ima efekat od 25% smanjenja NO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub> (Madireddy et al. 2011).

Saobraćajna zagušenja se često navode kao osnovni faktor koji utiče na povećanje emisije saobraćajnog toka i pogoršanje kvaliteta vazduha, odmah posle transportnog rada. Zagušenja se najviše povezuju sa emisijama CO i HC. Testiranja na novim vozilima su pokazala da zagušenja snažno utiču na pojavu povećanih emisija (Smit et al. 2008).

### **3.1.2 Uticaj različitih uslovima rada vozila na emisije**

Ukupna emisija vozila u toku jedne vožnje se sastoji od emisija u fazi zagrevanja, u fazi rada motora u stabilnim uslovima i usled isparavanja goriva. Koncentracije većine zagađivača u toku zagrevanja su mnogo puta veća nego u toku rada u stabilnim uslovima. Ovo je uglavnom posledica neefikasnost uređaja za redukciju emisije vozila (kao što su katalizatori) i nepotpunog sagorevanja goriva u fazi zagrevanja. Veće emisije usled zagrevanja su važan deo ukupne emisije s obzirom da prema podacima za 15 članica EU, 30% motorizovanih unutar gradskih kretanja je kraće od 2 km, a 50% kraće od 5 km (Smith, Wilson, & Armstrong, 2011). Veliki broj putovanja se može svrstati u putovanja koja se obavljaju u uslovima hladnog starta. Pored toga, temperatura motora utiče na stopu emisije, a odnos emisije usled hladnog starta i startovanja toplog motora se razlikuje (od 1 do 16 puta) u zavisnosti od tehnologije vozila, zagađivača i drugih parametara (Joumard et al. 1995).

Emisija VOC (HC) se javlja kao posledica isparavanja iz sistema za napajanje gorivom, posebno za vozila sa pogonom na benzin. Emisija usled isparavanja zavisi od razlike u temperaturi u toku dana ili promenama temperature u sistemu za napajanje gorivom koja se javljaju u toku vožnje. Gubici usled isparavanja goriva zavisi od četiri faktora: tehnologija vozila (opremljen ugljeničnim kanisterima), temperature i dnevne varijacije, isparivosti benzina (u zavisnosti od varijacije temperature) i saobraćajnih pokazatelja (prosečna dužina putovanja, parkiranja, itd). Emisija isparivih organskih jedinjenja se javlja i pri točenju goriva u rezervoar usled potiska koji gorivo stvara (Grant 1998). Dodatni podaci o principima kontrole sagorevanja sa akcentom na radu katalizatora dati su u prilogu (Prilog 1).

### **3.1.3 Uticaj eksploatacionih faktora na emisije vozila**

Opterećenje motora u realnim uslovima u saobraćajnom toku zavisi od brzine vozila, promene brzine (ubrzanja i usporenja), dodatnih potrošača (servo uređaji, klima...) i dodatnog opterećenja vozila (vuča, težina putnika). Svaka aktivnost koja zahteva napajanje (osim iz akumulatora) je proizvod motora. Rezultat je obogaćena smeša vazduh-gorivo da bi se zadovoljila potražnja. Većina dodatne opreme se može koristiti bez značajnog uticaja na opterećenje motora (Ahn et al. 2002).

Neke situacije mogu izazvati veću potrošnju snage u odnosu na normalne uslove kretanja, kao što su vuča dodatnog tereta, veći teret na vozilu, inercijalna opterećenja, otpor vetra i korišćenje klima uređaja. Da bi motor mogao da obezbedi dovoljno snage za kretanje vozila željenom brzinom potrebna je veća količina goriva u smeši. Podužni nagib saobraćajnice utiče na isti način kao i dodatni teret koji se vuče. Vozilo koje se kreće uz nagib mora da savlada gravitaciju kako bi se održala ista brzina (Grant 1998). Podužni nagib na deonicama je jedan primarnih uticaja na emisiju usled dodatne snage koja je potrebna vozilima da bi se održala ista brzina, uzrokujući visoko obogaćivanje smeše gorivom. Deonice na kojima postoje ulivanja, rampe, naplatne stanice i preplitanja mogu da povećaju nivo emisije zbog režima rada motora (Ahn 1998).

Važan aspekt kod opterećenja motora je i uticaj ponašanja vozača. Način upravljanja vozilom utiče na opterećenje motora. Problem se zasniva na raspodeli

vremena vožnje po različitim režimima kod različitih tipova vozača što dovodi do različitih opterećenja motora. Većina vozila je u stanju da ubrza u razumnim granicama, bez dodatnog obogaćenja smeše goriva. Međutim, ako vozač intenzivno ubrza, motor će morati da proizvode više snage. To je stanje u kom se smanjuje efikasnost iskorišćenja goriva i dolazi do dramatičnog povećanja emisije HC i CO.

Raspoloživa snaga varira u zavisnosti od brzine vozila. Tipičan američki benzinski motor ima dovoljno snage na raspolaganju za ubrzanja od 1.3-2.2 m/s<sup>2</sup> pri niskim brzinama bez obogaćivanja smeše vazduh-gorivo (Grant 1998). Pri višim brzinama manja je raspoloživa snaga zbog potrebe za održavanjem momenta. Ponašanje vozača je podjednako važno kao i razumevanje parametara rada motora. Agresivna vožnja će usloviti rad vozila u režimu sa obogaćenom smešom. Međutim, čak i pasivna vožnja može prouzrokovati rad vozila u režimu sa obogaćenom smešom usled eksternih efekata kao što su upotreba klime i nagib saobraćajnice (Grant 1998). Dodatni podaci o ekonomičnosti vozila u potrošnji goriva i potrebnoj snazi dati su u prilogu (Prilog 2).

### **3.1.4 Uticaj tehničkih karakteristike vozila na emisije**

Karakteristike vozila kao što su zapremina motora, snaga i težina utiču na emisije. Vozila sa velikim motorima emituju veće količine zagađivača nego vozila sa malim motorima. Motori velikih dimenzija najčešće imaju visoku maksimalnu snagu i utiču na ukupnu težinu vozila.

Emisije se menjaju u zavisnosti od starosti vozila. Starija vozila imaju veće emisije za vreme normalnog rada i startovanja (Bishop & Stedman 2008). Za starija vozila ne važe isti restriktivni standardi kao za novija vozilima. Model vozila iz 1975. godine emituje više od tri puta veću količinu CO i HC od modela vozila iz 1990 (Ahn 1998).

Čak i sa preciznom kompjuterskom kontrolom motora, ne može se postići potpuno sagorevanje goriva. Katalizator u izduvnom sistemu je najefikasnija tehnologija za smanjenje emisije. Katalizatori su razvijeni da zadovolje potrebe za redukcijom emisije i potrošnjom goriva bez uticaja na trajnost motora. Katalizatori se

postavljaju u izduvnu cev radi oksidacije HC i CO (formirajući H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) i smanjenja emisije NO<sub>x</sub>.

Standard kod modernih vozila se odnosi na tri osnovna zagađivači (CO, HC i NO<sub>x</sub>) njihovu oksidaciju ili umanjivanje. Lokacija katalizatora dalje od motora omogućava da se gas visoke temperature ohladi pre procesa smanjenja nivoa NO<sub>x</sub>. Jednocomorni katalizator ima sve katalitičke materije u jednom odeljku, a češće upotrebljavani dvocomorni konverter ima odeljak za redukciju (za NO<sub>x</sub>) i odeljak za oksidaciju (za HC i CO). Katalizator omogućava konverziju NO<sub>x</sub> u N<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>, samo uz pomoć eliminisanja kiseonika u toku izduvnog gasa. Međutim, oksidacionom delu katalizatora je potrebna višak kiseonika za konverziju CO i HC. Za efikasan rad standardnog katalizatora za tri komponente (HC, CO i NO<sub>x</sub>), smeša goriva i vazduha je od suštinskog značaja. Smeša sa manje goriva snižava efikasnost smanjenja NO<sub>x</sub>, a bogata smeša smanjuje oksidaciju HC i CO.

Katalizatori zahtevaju visoke temperature za efikasan rad, a dizajnirani su da koriste toplotu izduvnih gasova za ovu svrhu. Tokom perioda zagrevanja konverzija zagađivača je veoma niska. Katalizator je dizajniran tako da optimalno konvertujete zagađivače na radnim temperaturama, na osnovu stehiometrijskog odnosa vazduh-gorivo<sup>1</sup>. Sa 10 odsto bogatijom smešom se postiže optimalna snaga, a 95% od NO<sub>x</sub> može da se ukloni. Međutim, efikasnost katalizatora za CO i HC značajno opada pod uslovima bogate smeše. Nasuprot tome, efikasnost pod uslovima osiromašene smeše za CO i HC je veoma visok. Za NO<sub>x</sub> je neefikasan jer višak kiseonika smanjuje efikasnost katalizatora.

Ambijentalni uslovi, npr. temperatura, imaju uticaj kako na emisiju usled rada motora, tako i na emisiju usled isparavanja. Motoru i sistemima kontrole emisije je potrebno više vremena da se zagreju na niskim temperaturama što povećava emisiju zbog rada u uslovima hladnog starta. Sa porastom temperature dolazi do povećanja emisija isparavanja (Ahn 1998)

---

<sup>1</sup> Stehiometrijski odnos vazduh-gorivo (14.7:1): dodatno objašnjenje - Prilog 1

### *Zavisnost emisionih karakteristika vozila od uticajnih faktora*

Razlike u emisijama tokom godina su posledica promena svih prethodno navedenih elemenata. Emisija novih vozila u 1995. godini su bile na nivou manjem od 5% od prosečne emisije vozila iz ranih 1970-ih. Emisije motora opala je za oko 70%. Kontrolni sistem emisije smanjuje preostalu emisiju za oko 85 - 90% (Grant 1998).

Emisije vozila se povećavaju sa pređenom kilometražom kao posledica postepenog propadanja opreme za kontrolu emisija i drugih sistema na vozilu koji utiču na emisiju. Pored toga, emisija varira u zavisnosti od proizvođača. Emisije istog modela vozila i iste godine proizvodnje mogu da variraju. Emisioni sistemi se kvare u nekom slučajnom trenutku, a neka vozila se bolje održavaju tokom vremena od drugih (Grant 1998).

U različitim vremenskim periodima, ista vozila u istim uslovima u saobraćajnom toku, mogu da imaju emisije koje se značajno razlikuju, naročito usled kvara sistem kontrole emisija (Harrington & McConnell 2003) Nagib saobraćajnica (konfiguracija terena) utiče na uslove u saobraćajnom toku i veća opterećenja motora vozila, što doprinosi većim emisijama NO<sub>x</sub>.

### **3.2 Tipovi merenja kao osnova za emisione modele**

Za razvoj emisionog modela potrebni su podaci o emisijama. Postoje različite metode za merenje emisije: laboratorijska ispitivanja motora (laboratory engine bench testing), laboratorijski dinamometar za ispitivanje vozila (laboratory chassis dynamometer testing), merenja na vozilu u pokretu (on-board measurements) i merenja na saobraćajnici (road measurements) (Pimentel 2008). Najčešće korišćene metode za merenje emisije vozila su dinamometarski testovi u laboratorijskim uslovima, daljinska detekcija na specifičnim lokacijama na putu kao i tunelske studije (obe metode pripadaju merenjima na saobraćajnici) (Frey et al. 2002).

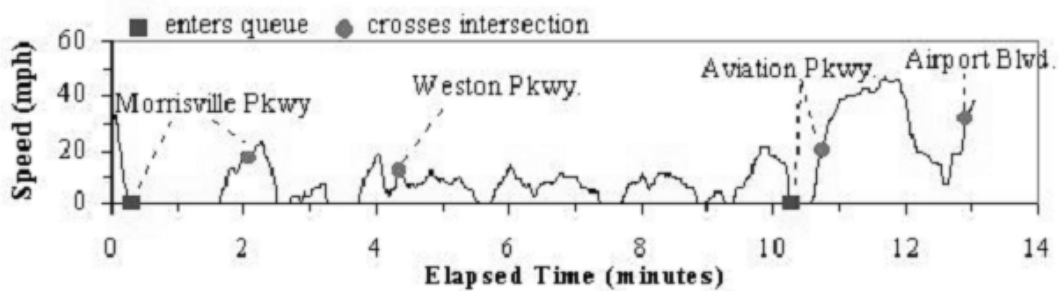
### **3.2.1 Laboratorijska i dinamometarska merenja**

Ovaj tip merenja je često korišćen, najčešće za validaciju podataka prikupljenih drugim načinima istraživanja (Kousoulidou et al. 2010). Kada se meri emisija izduvnih gasova u laboratoriji, vozilo je fiksirano i upravlja se pomoću dinamometra ili vozača u skladu sa određenim ciklusom vožnje, koji simulira karakteristične uslove u saobraćajnom toku (Ntziachristos & Samaras 2010; Pimentel 2008). Ciklus vožnje je unapred određena karakteristika promene brzine vožnje u kome su operativni uslovi u pogledu trenutnih brzina, a u nekim slučajevima i stepen prenosa, tačno definisani. Vozački ciklusi su modeli ponašanje u saobraćaju koji predstavljaju prosečno ponašanje u određenim uslovima i koji su razvijeni za određene klase vozila i za određeni period u toku dana (na primer ceo dan, vršni sat itd.) (Andre 2004a; Andre 2006). Upravlja se vozilom na takav način da se prati dijagram odnosa vremena i brzine (speed-time diagram) u okviru definisane tolerancije. Vozilom može da upravlja i test vozač uz pomoć dodatnih uređaja.

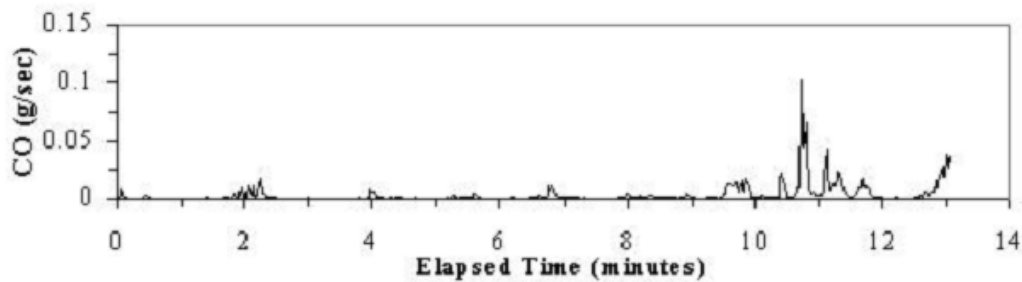
### **3.2.2 Merenja na vozilu u pokretu (On board)**

U istraživanju se koriste i vozila sa ugrađenim mernim sistemima za prikupljanje podataka o emisijama kao i podataka o karakteristikama promene brzine (driving pattern). Na ovaj način se realne emisije izduvnih gasova mogu registrovati pomoću mernih instrumenata (Frey et al. 2001a; Frey, Unal, Roupail, et al. 2003; Unal 2002) ili jednostavno uzorkovati (Dravitzki & Brown 1998), a uzorci se mogu analizirati po završetku putovanja radi dobijanja prosečnih emisija. Alternativno, emisije mogu se analizirati, a podaci obrađivati i čuvati u realnom vremenu za dobijanje trenutnih vrednosti emisije. Merenja u realnosti su korišćena u razvoju emisionog modela kao što je EPA Moves (US EPA 2009a; US EPA 2009b), na osnovu metodologije specifične snage vozila (Jiménez et al. 1999).

Ovaj primer takođe služi da opovrgne da su zaključci dobijeni iz merenja emisija vozila u pokretu u suprotnosti sa rezultatima "konvencionalnih" modela dobijenih na osnovu podataka sa dinamometra (Frey et al. 2001b; Frey, Unal, Roupail, et al. 2003).



Slika 3-1. Dijagram brzina/vreme putovanja (Frey et al. 2001b)



Slika 3-2. CO emisija vozila u odnosu na vreme putovanja (Frey et al. 2001b)

U principu, izmerene vrednosti zagađujućih materija (CO, HC, NO i CO<sub>2</sub>) ukazuju da postoji relativno veliki doprinos kratkoročnih događaja na specifičnim lokacijama u ukupnim emisijama (Frey et al. 2001a).

Tako su studije emisije vozila u pokretu obično bile fokusirane na veoma mali uzorak. Međutim, u poslednjih nekoliko godina, postojali su naponi da se razviju jeftinije instalacije za merenje aktivnosti i emisija štetnih gasova vozila (Vojtisek-Lom & Cobb 1997). Koncept koji su razvili je komercijalizovan je plasiranjem na tržište, OEM-2100TM prenosnog sistema za merenje emisije.

### 3.2.3 Merenja emisija na saobraćajnici

Daljinska detekcija (Remote sensing) je jedan od merenja emisija na putu. Pored daljinske detekcije postoje i uzorkovanje emisije u saobraćajnom toku i uzorkovanja emisija u fiksnoj tački.

Daljinska detekcija je pristup merenja trenutnih vrednosti emisije izduvnih gasova na saobraćajnici koje proizvodi celokupni saobraćajni tok i celokupni vozni park. Rezultat su emisioni faktori na bazi potrošnje goriva, tj g/kg goriva (Harrington & McConnell 2003; Pimentel 2008). Daljinska detekcija je doprinela povećanju

razumevanje realnih emisije vozila i koristan je izvor podataka za validaciju emisionih modela (Pimentel 2008).

Daljinska detekcija je razvijena za praćenje emisija CO, HC i NO na izduvnoj cevi vozila uz pomoć infracrvenih zraka. U sistemu se meri odnos zagađivača u izduvnom oblaku prolaskom zraka infracrvene svetlosti kroz oblak i merenjem zračenja koja je tom prilikom apsorbirana u određenim frekvencijama. Procenat CO u oblaku se može proceniti korišćenjem hemijskih principa idealnog sagorevanja, trenutnog odnosa vazduh/gorivo, grama CO emitovanih po litru benzina i protoka (Frey et al. 2002).

Senzori za daljinsku detekciju se mogu uvezati sa detektorima, radarom ili optičkim uređajima da bi se izmerile trenutne brzine i ubrzanja vozila koja se kreću preko infracrvenog snopa. Raspodela vozila po aktivnosti i povezivanje sa utvrđenim emisijama se može utvrditi pri prolasku preko snopa. Ova tehnologija obezbeđuje sredstvo za identifikaciju vozila sa visokim emisijama i vozila koja ne bi uspela da prođu tehnički pregled (Lawson et al. 1990). Kao i određivanje procenta voznog parka (obično manje od 20%) koji većinski učestvuju u ukupnoj emisiji (Frey et al. 2002).

Uzorkovanje emisija u fiksnim tačkama se koristi za indirektnu procenu srednjih emisionih faktora saobraćajnog toka (modeliranje "inverzne" disperzije – inverse dispersion modelling). Ambijentalne koncentracije zagađivača u vazduhu se prate uz ivicu puta ili u tački iznad puta (Pimentel 2008). U zavisnosti od pozicije fiksne tačke sprovedena su tunelska istraživanja i specifična istraživanja na nagibima.

Rezultati tunelskih studija se razlikuju i variraju usled razlike trenutnih izmerenih vrednosti i prostorne lokacije prikupljanja podataka o emisijama, uključujući aktivnost i karakteristike vozila, kao i uslovima okoline. U tunelskim studijama treba da se beleži režimska aktivnost vozila, sa akcentom na promene brzine i ubrzanja na lokacijama koje će verovatno uticati na režimsku aktivnost (promenu režima kretanja).



Ova metoda je koncipirana tako da eliminiše efekat vetra. Međutim, vremenska distribucija nekih zagađujućih materija izmerenih na takav način ne može predstavljati uslove ambijentalnog vazduha (Costabile & Allegrini 2008).

### **3.3 Tipovi emisionih modela**

Veći deo istraživanja je do sada bio koncentrisan na uticaj faktora, kao što su kapacitet motora, tip goriva, brzina i stopa ubrzanja. U odnosu na to u narednom poglavlju biće razmotreni sledeći tipovi modela:

- Modeli emisionih faktora
- Modeli prosečne brzine
- Režimski modeli

Zbog velike sličnosti sa prethodno navedenim modelima biće predstavljeni i modeli zasnovani na merenjima emisija u svakoj sekundi.

#### **3.3.1 Modeli emisionih faktora**

Modeli agregatnih emisionih faktora su najjednostavniji, sa jednim emisionim faktorom za svaku vrstu vozila i opšti tip vožnje, gde je uobičajena podela na gradske saobraćajnice, ruralne puteve i autoputeve. Rad vozila se stoga uzima u obzir na osnovnom nivou, a pristup ne može da se koristi za određivanje emisije za situacije koje nisu eksplicitno definisane. Emisioni faktori su izračunati kao srednje vrednosti ponovljenih merenja na više vozila u različitim ciklusima vožnje, i obično se izražavaju u odnosu na masu emitovanih zagađujućih materija po vozilu i po jedinici rastojanja (g/vozilu/km) ili po jedinici potrošenog goriva (g/litru). S obzirom na njihovu jednostavnost, ovi faktori su od najveće koristi u primeni na velikom prostornom obuhvatu, kao što su nacionalni i regionalni katastri emisija, gde su potrebne informacije o vozilima sa malim nivoom detaljnosti (Barlow et al. 2007a). Modeli su jednostavni za primenu pri proceni emisija, ali imaju nedostatke po pitanju neosetljivosti na raspodelu kretanja po načinima.

Nemačko-švajcarski model (HBEFA) je rezultat petogodišnjeg zajedničkog istraživačkog projekta sa ciljem da se utvrdi emisija svih relevantnih kategorija drumskih vozila u dve zemlje (Pimentel 2008). Emisioni faktori u ovom modelu nisu bili predstavljeni kao kontinualna funkcija (npr. srednje brzine) već su

parametarska diskretna funkcija koja je zavisila od saobraćajnog toka. Parametri saobraćajnog toka su opisani na osnovu načina promene brzine. Karakteristike promene brzina omogućavaju proračun širokog opsega kinematičkih parametara čime je opisan saobraćajni tok. Osnova za razvoj emisionih faktora je bila veoma opsežna baza podataka o trenutnim emisijama vozila (oko 760000s) (de Haan & Keller 2004).

### **3.3.2 Modeli prosečne brzine**

Funkcije emisija na osnovu prosečne brzine su često u upotrebi na nacionalnom i regionalnom nivou, ali su trenutno često u upotrebi i u velikom broju lokalnih modela za prognozu zagađenja vazduha<sup>2</sup>. Modeli prosečne brzine se zasnivaju na principu da prosečan emisioni faktor za određenu zagađujuću materiju i određenu vrstu vozila varira u zavisnosti od prosečne brzine tokom putovanja. Emisija se obično izražava u gramima po kilometru (g/km).

Smatra se da postoji niz nedostataka ovih modela (Barlow et al. 2007a):

- Putovanja sa veoma različitim karakteristikama rada vozila, pa samim tim i emisionim karakteristikama, mogu imati istu prosečnu brzinu.
- U skladu sa regulativom za redukciju zagađenja vozila mogu biti opremljena sofisticiranim uređajima za obradu emitovanog gasa.
- Oblik funkcije prosečne brzine nije fundamentalan, ali zavisi od tipa ciklusa koji se koristi za razvoj funkcije.
- Modeli prosečne brzine ne omogućavaju preciznu prostornu raspodelu u proceni emisija.

Najčešće korišćen model prosečne brzine u Evropskim uslovima je metod za procenu emisija od drumskog saobraćaja, COPERT IV baza podataka (Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport - Kompjuterski program za

---

<sup>2</sup> Primer je prikazan u modelu priručnika za dizajn puteva i mostovi (DfT 2007) i modelu COPERT 3, Evropske agencije za životnu sredinu (Ntziachristos & Samaras 2000)

računanje emisija drumskog transporta (Ntziachristos & Samaras 2000). Cilj programa COPERT IV je procena emisija zagađenja vazduha od drumskog saobraćaja. Razvoj COPERT-a je finansiran od strane Evropske agencije za životnu sredinu (EEA), u okviru aktivnosti EIONET (European Topic Centre on Air and Climate Change). Omogućeno je, sa jedne strane transparentno i standardizovano, a sa druge, konzistentno i uporedivo prikupljanje podataka i formiranje izveštaja o emisijama u skladu sa zahtevima međunarodnih konvencija i protokola zakonodavstva EU (Institut saobraćajnog Fakulteta/ISF 2010; Ntziachristos & Samaras 2010).

COPERT model je baziran na emisijama generisanim na osnovu različitih vozačkih ciklusa. Meri se prosečna emisija za svaku ciklus u celini i dodeljuje prosečnoj brzini vožnje za uzorak. Merenja za nekoliko vozila sa istom tehnologijom (tip motora, godište i emisioni standard) i klasom motora, dobijenih tokom nekoliko ciklusa vožnje se grupišu. Izvodi se emisiona funkcija zavisna od brzine. Ovo se ponavlja za sve klase vozila. To znači da je pored tipa vozila, prosečna brzina vozila, odlučujući parametar koji se koristi za procenu emisije. Metodologijom je primena ograničena na regionalni i nacionalni nivo. Dinamika ponašanja vozača, koja je posebno značajna u urbanim sredinama, je uzeta u obzir samo implicitno (Ntziachristos & Samaras 2010).

Za ovu svrhu COPERT IV se smatra adekvatnim za izračunavanje ukupne emisije štetnih gasova i potrošnje goriva za relativno nisku prostornu i vremensku rezoluciju. U opštem slučaju COPERT IV može da se koristi sa dovoljnim stepenom sigurnosti za prostorne rezolucije od 1km<sup>2</sup> i vremenskom rezolucijom od 1 sata. Potrebna je relativno mala količina ulaznih informacija imajući u vidu veličinu saobraćajne mreže i moguća je obrada podataka iz transportnih modela (Pimentel 2008).

Analizom na osnovu danskog operativnog modela za predviđanje zagađenja na ulicama, utvrđeno je da će primena COPERT emisionih faktora dovesti do značajnog potcenjivanja nivoa koncentracija (Kousoulidou et al. 2010).

Dva glavna modela za procenu emisija koja se najčešće koriste u SAD su MOBILE model, Agencije za zaštitu životne sredine (EPA) i EMFAC model, Kalifornijskog

odbora za vazduh (CARB). U oba modela, emisija je u funkcija tipa vozila i starosti vozila, prosečne brzine, temperature okoline i režima rada vozila. Oba modela daju rezultat u obliku specifičnih stopa emisija. Specifične emisije pomnožene sa izmeriteljima aktivnosti vozila, kao što su transportni rad, broj putovanja i vreme putovanja rezultuju procenama ukupnih nivoa (Ahn 1998; Den Braven et al. 2012).

Procene emisija uz pomoć navedenih modela do 2000. godine su izražene u funkciji prosečnih brzinama i na osnovu testiranja vozila na ograničenom broju ciklusa vožnje. Ciklus vožnje se sastoji od jedinstvenog niza različitih režima vožnje, a glavna karakteriše mu je ukupna ponderisana prosečna brzina (NRC 2000). Različiti ciklusi vožnje se koristi za predstavljanje vožnje pod različitim uslovima u saobraćajnom toku. Merenja emisija za različite cikluse vožnje se obično vrši na dinamometru u laboratorijskim uslovima. Problem sa ciklusima vožnje je da oni ne mogu biti reprezentativni u emisija u realnim uslovima u saobraćajnom toku (Andre 2004b; Joumard et al. 2000; Andre 2004a; Andre 2006; NRC 2000).

Jedan od glavnih trendova u istraživanjima pri kraju XX veka je bio kreiranje boljih emisionih modela u odnosu na karakteristika promene brzine, odnosno jakih ubrzanja i visokih brzina. Dotadašnji modeli nisu dobro predstavljali navedene uslove u saobraćajnom toku kroz cikluse vožnje i to je bio glavni razlog potcenjivanja nivoa emisije. (Ahn 1998; Joumard et al. 2000; Andre 2004b)

EMFAC model je jedan od četiri MVEI modela (Motor Vehicle Emission Inventory) koji se zajedno koriste za razvoj katastra emisija u Kaliforniji. EMFAC dobija ulazne podatke iz CALIMFAC-a, koji pruža osnovne vrednosti emisija. Model WEIGHT procenjuje aktivnost vozila u zavisnosti od godine da bi se dobili faktori emisije. Poslednji model BURDEN kombinuje podatke o transportnom radu vozila (vozilo kilometri, broj vozila) sa emisionim faktorima iz EMFAC-a za izradu katastra emisija. EMFAC 2000 model računa osnovne emisije u vožnji zagrejanih motora izražene u gr/milji, za laka teretna vozila na benzin, koji su klasifikovani na osnovu godišta, tehnologije vozila (karburator ili direktno ubrizgavanje goriva) i režima emisije (normalan, umeren, visok, vrlo visok i super), a sve za tri različita zagađivača vazduha (CO, HC, NO<sub>x</sub>) i CO<sub>2</sub> (Pimentel 2008).

MOBILE6 model je poboljšán u odnosu na prethodne verzije modela, jer se zasniva na ciklusima vožnje dobijenih tokom studija aktivnosti vozila u različitim gradovima. Međutim, pošto je osnova podataka dobijenih iz ciklusa vožnje obično prosečno putovanje nije moguće proceniti emisije u manjoj vremenskim ili prostornim domenima. Tako se podaci iz karakterističnih ciklusa vožnje ne mogu koristiti za procenu izduvnih gasovi iz vozila na mikro ili mezo modelskom nivou. Na primer, poboljšanja u upravljanju saobraćajem (koordinacija rada signala) ne može biti procenjena na osnovu modela baziranog na ciklusima vožnje (NRC 2000).

Nacionalni istraživački savet (The National Research Council - NRC) je 2000. godine razmatrao strukturu i performanse MOBILE modela, istražujući načine da se poboljša model. Jedna od preporuka istraživanja je da se razvije sposobnost za procenu emisija na različitim nivoima, kao što su mikro i mezo i makro (NRC 2000).

Problem sa procenama emisija u aktuelnim modelima je bio baziranje isključivo na promenama u prosečnim brzinama pored velikog broja karakteristika saobraćajnih tokova. Prosečne brzine celokupnog putovanja nisu ekvivalentne brzinama na deonicama kojima se realizuje putovanje. Metod koji koristi prosečnu brzinu ne može da predstavi raspodelu brzina i ubrzanja jednog putovanja, koja zavisi od vrste deonica i stepen zagušenja na deonicama. Tako koncipirani emisijski modeli nisu mogli da prave razliku između veoma prometnog autoputa i magistrale sa normalnom gustinom saobraćaja na kojima se ostvaruje ista prosečna brzina, iako imaju sasvim drugačiju raspodelu brzina i ubrzanja i izazivaju različite emisije (NRC 2000).

TEE model (Traffic Energy and Emissions) (Negrenti & Zanini 1999) predstavlja korigovani model prosečnih brzina. Model pretpostavlja da se efekti zagušenja na emisiju pri određenoj prosečnoj brzini mogu izraziti pomoću korekcionih faktora generisanih iz prosečne brzine, procenta zelenog vremena, dužine deonice i gustine saobraćajnog toka. (Barlow et al. 2007a).

### 3.3.2.1 Modeli saobraćajnih situacija

Jedan od alternativnih pristupa za uključivanje brzine i dinamike ciklusa u procenu emisija uključuje modeliranje saobraćajnih situacija, gde se prosečne stope emisija tokom ciklusa stavljaju u korelaciju sa različitim parametrima ciklusa vožnje. Različite saobraćajne situacije se povezuju sa uslovima u kojima postoji specifična emisija, i za koje prosečna brzina nije najbolji pokazatelj emisije. Modeli saobraćajnih situacija imaju potencijal da budu najbolje rešenje za lokalne uslove u kojima se zahteva procena emisije za pojedine deonice, ali se takođe može koristiti za regionalne i nacionalne procene (Barlow et al. 2007a).

Korisnik mora biti u stanju da prepozna situacije na način na koji su definisane u modelu. Na primer, priručnik emisijih faktora (HBEFA), koristi se u Nemačkoj, Austriji i Švajcarskoj, i zasniva se na referentnim emisijim faktorima za različite kategorije vozila. Svaki emisijni faktor je povezana sa posebnom saobraćajnom situacijom koju karakterišu osobine deonice (npr. autoput 120 km/h ograničenje, magistralni put van izgrađenog područja). Varijacija brzine (tj. dinamika) nije kvantifikovana od strane korisnika nego je tekstualno opisana (npr. slobodan tok, stani kreni režim) vrstama saobraćajnih situacija u kojoj se primenjuje faktor emisije (INFRAS 2004). Kao i kod ostalih modela, emisijni faktori na osnovu Priručnika za različite kategorije vozila moraju biti ponderisani prema obimu saobraćaja i strukturi toka (Barlow et al. 2007a).

Međutim, potreba da korisnik definiše situaciju u saobraćaju koristeći tekstualni opis varijacije brzine ili dinamike može dovesti do nedoslednosti u tumačenju. Čak i kvalitativni opisi, kao što su oni koji su korišćeni u HBEFA, mogu da bude nepogodni za mnoge korisnike, a očigledno su otvoreni za individualne interpretacije. Osim toga, ne postoje univerzalno prihvaćene definicije za saobraćajne situacije, i verovatno će tu postojati značajne razlike između apsolutnih karakteristika saobraćaja u različitim gradovima. Pored toga, u Priručniku se koriste definicije koje se zasnivaju na tipu puta ili ulice, umesto na emisijama. Iako je poznato da postoje fundamentalne veze u odnosu između karakteristika saobraćajnica (npr. broj traka, širina kolovoza, topografija), dominantnog saobraćaja (npr. protok, struktura) i rada vozila, njihovi uticaji na emisije vozila su manje poznati (Colberg et al. 2005).

### **3.3.3 Režimski (modalni) modeli**

U režimskim modelima emisioni faktori se dodeljuju specifičnim režimima rada vozila u toku vožnje. Različite vrste režimskih modela su u upotrebi, i terminologija koja se koristi može biti prilično zbunjujuća. U jednostavnijim tipovima režimskih modela, rad vozila se definiše kroz relativno mali broj režima - stanje mirovanja (prazan hod), ubrzanje, usporenje i kretanje ravnomernom brzinom (NRC 2000; Barth et al. 1996; Frey et al. 2001a). Ovaj tip modela se obično naziva režimskim. Izvestan broj detaljnijih režimskih modela imaju za cilj da obezbede precizniji opis emisija vozila na osnovu stopa emisija vozila tokom kratkih vremenskih intervala (često jedne sekunde). Nekoliko različitih termina se koristi da se opišu detaljniji modeli, uključujući i „trenutni“, „mikroskopski“, „neprekidan“, „trenutni“ i „on-line“ (de Haan & Keller 2000). Termin „trenutni - instantaneous“ se dosta često koristi u literaturi pa je odabran kao najadekvatniji.

Režimsko modelirane emisije zahteva beleženje vrednosti emisija na izduvnoj cevi kontinualno tokom ispitivanja, obično u svakoj sekundi. Da bi se procenili efekti u vezi sa dinamikom vožnje, rad vozila u različitim režimima i emisije u različitim uslovima u saobraćajnom toku treba da se analiziraju. Režimski emisioni modeli su zasnovani na odnosu emisije i režima rada vozila. Trenutno stanje vozila, definisano u modelu na osnovu trenutne brzine i ubrzanja se istovremeno beleži sa stepenom emisije. Na ovaj način, je moguće generisati funkcije emisije dodeljivanjem tačno definisane vrednosti emisije za određene uslove u saobraćajnom toku (West et al. 1999). Problem takvog pristupa je da se ne tretiraju adekvatno druge promenljive koje mogu da utiču na emisiju, kao što su nagib saobraćajnice ili korišćenje dodatne opreme (Barth et al. 1996). Još jedna mana je da istorija vozila nije uzeta u obzir, kao i da emisije vozila u datoj sekunde može biti funkcija prethodne brzine i ubrzanja (NRC 2000). U statističkoj terminologiji, to se odnosi na autokorelaciju u vremenskoj seriji u svakoj sekundi merenja emisija (Frey et al. 2002).

Dva su osnovna tipa režimskih emisionih modela:

- Emisiona funkcija za svaki zagađivač je definisana kao dvodimenzionalna matrica, sa intervalima brzina u redovima i proizvodom brzine i ubrzanja u

kolonama (ili ređe samo ubrzanjem). Proizvod brzine i ubrzanja će u daljem tekstu biti predstavljen teminom „potrebna snaga“, koji predstavlja njegovu fizičku interpretaciju. Svi podaci o trenutnim emisijama se smeštaju u jednu ćeliju matrice emisija, prema brzini i ubrzanju za mereno vozila u tom trenutku. Rezultujuća emisija je aritmetička sredina svih izmerenih emisija u ćeliji emisione matrice. Dakle, emisiona funkcija se formira dodeljivanjem emisija za svaki par koji čine brzina i potrebna snaga. U režimskom modeliranju, emisione funkcije se koriste za izračunavanje emisije vozila u bilo kom ciklusu vožnje, na osnovu brzine i ubrzanja u svakoj sekundi ciklusa (Pimentel 2008).

- Emisija se bazira na mapi opterećenja motora. Konceptualni pristup pretpostavlja povezivanje informacija o brzini i trasi u realnom vremenu sa informacijama o trenutnom broju obrtaja i parametara opterećenja vozila odnosno motora. Mapa opterećenja motora se koristi da bi se generisala trenutna emisija za određene brojeve obrtaja motora i opterećenja, kao i da se dobije zbir kontinualnih trenutnih emisija koje čine ukupnu emisiju na osnovu zabeležene aktivnosti vozila. Potencijalna slabost je da emisije koje se dešavaju pod trenutnim uslovima ne mogu biti adekvatno predstavljene na emisioj mapi koja je izvedena u uslovima stabilnog rada (LeBlanc et al. 1995; North 2006).

U istraživačkim studijama su vršena merenja na dinamometru i vozilima da bi se dobile emisije u svakoj sekundi rada u odnosu na režim rada motora (Den Braven et al. 2012). Rezultati su pokazali da su emisije CO i HC velikoj meri zavisne od različitih režima ubrzanja. Razvijeni su i konkretni režimski emisioni modeli (npr. Frey et al. 2002). Jedan pristup režimskog modeliranja emisija je predložio Barth (1996). Model je deterministički i baziran na analitičkim funkcijama. Opisuje fizičke pojave u vezi sa radom vozila i produkcijom emisije (Barth et al. 1996).

### 3.3.3.1 Režimski modeli bazirani na brzini i ubrzanju

Pogodan metod za opisivanje režimskih događaja je uspostavljanje matrice brzina/ubrzanje (Kishi et al. 1996; Zachariadis & Samaras 1997). Matrica



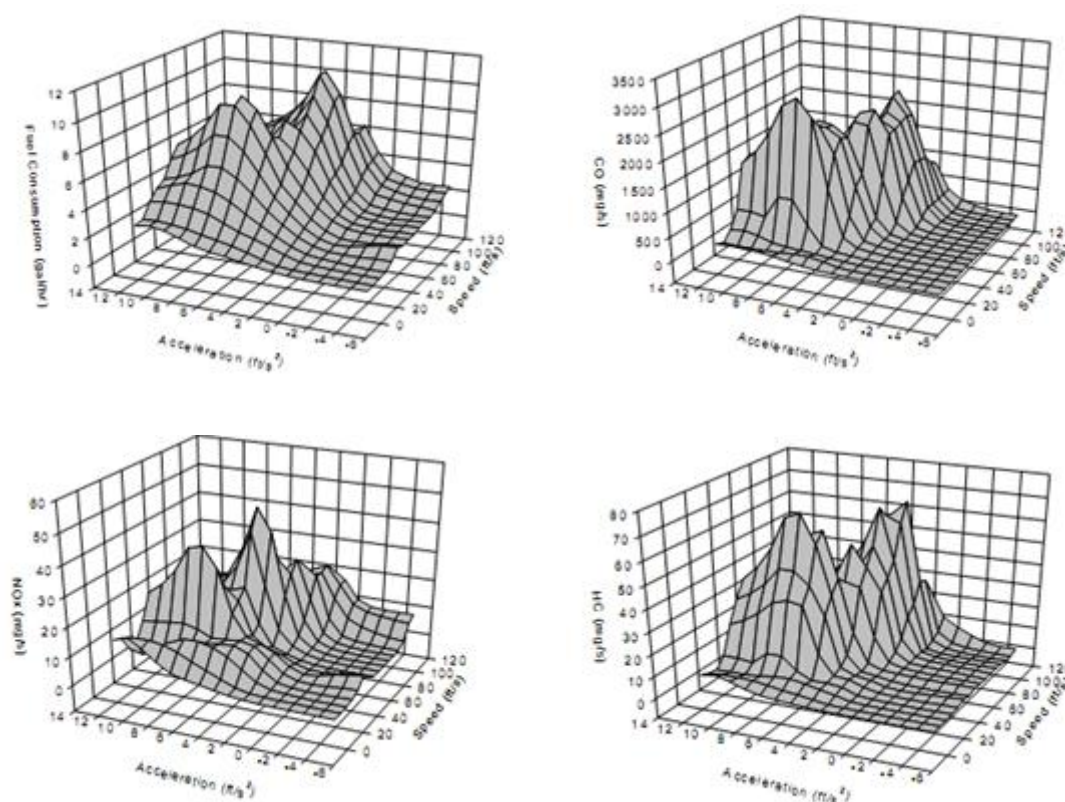
brzina/ubrzanje daje trenutne emisije za različite kombinacije trenutnih brzina i ubrzanja. Za svaku ćeliju brzine i ubrzanja definiše se srednju vrednost emisije.

Za svaku klasu definišu se linije koje najbolje odgovaraju podacima o trenutnim brzinama, na osnovu regresione analize. Ovaj metod u stvari koristi specifičan slučaj na osnovu mape brzina/ubrzanje sa pet klasa ubrzanja. Na taj način se smanjuje broj podataka koji su potrebni za izradu mape. Problem ovog pristupa je rezolucija klasa brzina/ubrzanje. Teoretski, što je finija rezolucija matrice to je veća preciznost. Međutim, veoma je zahtevno po pitanju podataka, izraditi mapu fine rezolucije (npr. na svakih 0,1 km/h). Zbog ograničenja vremena i ljudskih resursa veoma je teško, ako ne i nemoguće, prikupiti ovako veliku količinu podataka. Izrada mape brzina/ubrzanje sa rezolucijom 0,1 km/h je nerealna, ako ne i nemoguća (Kenworthy & Laube 1999).

Georgia Tech je razvijala emisioni model baziran na geografskim informacionim sistemima. Ovaj model nazvan MEASURE (Mobile Emission Assessment System for Urban and Regional Evaluation) predviđa emisije u funkciji režima i rad u uslovima koji zahtevaju korišćenje obogaćene smeše goriva ili visokim odnosa vazduh/gorivo) korišćenjem specifičnih karakteristika vozila i odnosa brzine i ubrzanja (Grant 1998).

Sirovi podaci sadrže 1300-1600 pojedinačnih podataka o vozilima, svaki prikupljen svake sekunde tokom vožnje različitih ciklusa. Tipično, vrednosti ubrzanja vozila su u rasponu od -1.5 do 3.6 m/s<sup>2</sup> (u intervalima od 0.3 m/s<sup>2</sup>), a brzina varira od 0 do 120 km/h. Uzorak podataka za mini van vozilo je prikazan na slici (Slika 3-3). Uočljivi su nelinearni trendovi za neke od vrednosti snage i emisija u funkciji brzine i ubrzanja. Primetne su i ekstremne vrednosti (kao maksimalne pozitivne i negativne vrednosti) potrošnje goriva, emisija CO, HC i NO<sub>x</sub> kao posledica promene stepena prenosa pod različitim uslovima u saobraćajnom toku. Podaci predstavljaju posebne odnose brzine i ubrzanja koji definišu jedinstveni sklop performansi vozila. Na primer, vozila sa visokim odnosom snage i težine imaju bolje karakteristike ubrzanja pri visokim brzinama nego vozila sa niskim odnosom snage i težine. Ovo ograničenje je izuzetno važno kada se emisioni modeli koriste u kombinaciji sa mikroskopskim saobraćajnim modelima, jer predstavljaju

fizičko, kinematičko ograničenje u jednačinama kojima se definiše sleđenje vozila u kretanju. (Grant 1998; LeBlanc et al. 1995)



Slika 3-3. Primer odnosa u režimskom modelu (Ahn et al. 2002)

Prikazani su odnosi potrošnje goriva, emisije CO, NO<sub>x</sub> i CH<sub>4</sub> (po redu) u odnosu na promenu brzine i ubrzanja.

### 3.3.3.2 Režimski emisioni modeli bazirani na opterećenju vozila

Koristi se i modifikovani pristup koji se bazira na potrebnoj snazi, umesto ubrzanja. U modelu koji je razvijen na Univerzitetu u Kaliforniji - Riverside (Barth et al. 1996), proces emisije je razbijen na različite komponente u vezi sa radom vozilom i stvaranjem emisije. Emisije ovog tipa modela se mogu generisati ako postoje podaci o promeni brzine u svakoj sekundi i dodatnih opterećenja (nagib, upotreba klima uređaja, itd.) Model za generisanje režima rada vozila (TRANSIMS) obezbeđuje ulazne podatke na osnovu kojih se procenjuju emisije (Pimentel 2008).

Režimski emisioni modeli su razvijeni od strane mnogih istraživača. St Denis i Viner su stvorili režimske emisione modele brzina-ubrzanje kao i brzina-potrebna

snaga koristeći podatke iz jednog vozila. Istraživači Sierra Research su proširili VEHSIM model, originalno razvijen u GM-u za izračunavanje brzine i opterećenja motora, da bi stvorili model za predviđanje emisija za određene cikluse vožnje. Model izračunava brzinu i snagu motora neophodne za vožnju određenog ciklusa, a zatim, koristeći emisiju mapu (sa interpolacijom), aproksimiraju se emisije u svakoj sekundi. EPA je na sličan način proširila VEHSIM model za kreiranje režimskog modela emisija pod nazivom VEMISS. Istraživači na Univerzitetu Mičigen su razvili fizički model koji predviđa potrošnju goriva za bilo ciklus vožnje ili karakteristiku putovanja i dodatno proširen model za predviđanje CO emisije (Ahn 1998).

Emisioni model MODEM je razvijen u okviru „DRIVE“ istraživačkog programa (Joumard et al. 1995). Podaci su grupisani i u većem broju režima: slabo i jako usporenje, krstarenje, kao i slabo i jako ubrzanje (Cernuschi et al. 1995).

### 3.3.3.3 Emisiona mapa na osnovu snage motora i brzine

Još jedan pristup u okviru režimskog modelovanja emisija je da se razvije mapa emisija zasnovana na snazi motora i brzini (West et al. 1997). Trenutne podatke vezane za rad motora, kao što su brzina motora i temperatura izduvnih gasova su dobijeni na putu, kao funkcija brzine i ubrzanja. Uslovi rada motora su zatim simulirani na laboratorijskom dinamometru i da bi se izmerile odgovarajuće emisije i potrošnja goriva. Skupovi podataka se zatim objedinjuju da bi se dobio odnos emisija i potrošnja goriva u funkciji brzine i ubrzanja. Ove mape služe kao tabele emisija i potrošnje goriva u zavisnosti od kombinacije brzine i ubrzanja. Opet, rezolucija tabele predstavlja problem. Pored toga, metod mapiranja emisija može biti veoma dugotrajan zbog definisanja veza između uslova rada motora i emisije, potrošnje goriva i brzine (Barth et al. 1996).

Primer karte zasnovane na snazi motora i brzini je EcoGest model (Silva et al. 2004). Ovaj model može da reši dinamičke zakone vozila za uslove koji su definisani posebnim funkcijama ubrzanja i usporenja tipičnih režima vožnje (spor, normalan i agresivni). Glavni ulazi u EcoGest su tip vožnje, karakteristike vozila, broj putnika, vreme provedeno u stanju mirovanja i trase, koju karakteriše topografija, broj i lokacija „stop“ znakova i maksimalna dozvoljena brzina. Na

osnovu tih ulazih podataka, EcoGest je u stanju da izračunavanja duž puta: lokacije vozila, brzinu vozila, poziciju pedale gasa, stepen prenosa i broj obrtaja motora. Pored toga, korišćenjem položaja pedale gasa i broja obrtaja motora, ovaj model je sposoban da procene trenutnu potrošnju goriva, kao i trenutne i prosečne emisije NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> i HC. Ovi proračuni se obavljaju pomoću disperzionih mapa emisija i potrošnje goriva u funkciji brzine motora i pozicije pedale gasa. Mape se mogu dobiti numerički ili eksperimentalno (Silva et al. 2004).

Agregatni pristup u modeliranju korišćen od strane Džordžija Instituta za Tehnologiju u okviru programa za procenu emisije (Mobile Emission Assessment System for Urban and Regional Evaluation - MEASURE) korišćen je za razvoj modela koji je sličan mapiranju emisija ali je baziran na podacima iz test balona da bi se izvele emisije od režimskih aktivnosti (Washington et al. 1997). Model procene se sastojao od više od 13.000 podataka laboratorijskih testova sprovedenih od strane EPA i CARB koristeći standardizovane uslove test ciklusa i alternativnih ciklusa. Hijerarhijska regresiona analiza je primenjena na bazu podataka koristeći nekoliko tehnologija vozila i karakteristika rada kao promenljive koja objašnjava varijabilne vrednosti emisija. Promenljive u vezi sa aktivnošću vozila su prosečna brzina, ubrzanje, usporenje, vreme rada u praznom hodu i dodatna oprema koja opterećuje motor (Frey et al. 2002).

#### 3.3.3.4 Režimsko modelski pristup na osnovu fizičke snage i zahteva

Bart i saradnici su razvili sveobuhvatni režimski emisioni model (CMEM - Comprehensive Modal Emission Model). U ovom pristupu, proces emisije je podeljen na različite komponente koje dovode fizičke pojave u vezi sa radom vozilom i emisijom (Barth et al. 1996). Svaka komponenta je posebno analitički modelovana i sastoji se od 55 delova karakterističnih za proces. Podaci sa dinamometar testova različitih vrsta vozila su korišćeni za kalibraciju parametara. Ovaj pristup obezbeđuje objašnjenje za varijacije emisijama u odnosu na različite parametre i potencijalno može da obuhvata sve faktore u okruženju vozila u radu koji utiču na emisiju izduvnih gasova. Međutim, ovaj pristup zahteva veoma veliki obim podataka. Postoji veliki broj fizičkih promenljivih koje treba utvrditi za različite tipove vozila. Osim toga, veliki broj parametara može iskomplikovati

modelovanje. U okviru ovog modela su identifikovane 24 kategorije vozila na osnovu goriva i tehnologije kontrole emisije vozila (Pimentel 2008).

Režimski emisijski model koji su razvili (An et al. 1997), zasnovan je na jednostavnom parametarskom fizičkom pristupu i sastoji se od šest modula koji predviđaju potrebnu snagu motora, brzinu motora, odnos vazduh/goriva, potrošnju goriva, emisiju motora i frakcije prolaska kroz katalizator. Ovaj model je generisan na osnovu 300 realnih vozila na laboratorijskom dinamometarskom testu. Tri dinamične promenljive: brzina u svakoj sekundi, nagib i korišćenje dodatne opreme (kao što su klima uređaji) su korišćene kao ulazne promenljive. Trenutne emisije su modelovane kao proizvod tri komponente: potrošnje goriva, emisionog faktora (gram emisije/gram goriva) i frakcija prolaska kroz katalizator.

Fizičkim modelima može najpreciznije da se modelira emisija. Procena emisije se zasniva na ulaznim podacima vozila. Na primer, poznavanje motora, broja cilindara i kompresije, usisnog pritiska vazduha, zapreminske efikasnosti i mnogi drugi parametri mogu da predstavljaju osnovu za predviđanje potrošnje goriva i emisije izduvnih gasova sa adekvatno kalibrisanim modelom. Problem sa modelom može da bude veoma veliki broj ulaznih podataka koji se tipično ne mere u studijama aktivnosti vozila. Stoga, bilo bi nepraktično koristiti takve modele za procenu prosečne emisije voznog parka ili za mnoge druge svrhe. Takvi modeli su korisne za pružanje uvide u ključne faktore koji utiču na emisiju ali ne može da bude praktičan za korišćenje na nacionalnom nivou ili čak na urbanom nivou za javne institucije (Frey et al. 2002).

#### 3.3.3.5 Modeli zasnovani na potrošnji goriva

Centar za istraživanje životne sredine i tehnologiju na Univerzitetu u Kaliforniji (Riverside) je razvio režimski model emisija za putnička vozila izvedenih u funkciji od režima rada vozila. Model predviđa emisiju u svakoj sekundi na izduvnoj cevi (i na izlazu iz motora) i potrošnju goriva za različite kategorije vozila u različitim stanjima vozila (npr. ispravno stanje, pogoršano i neispravno) (An et al. 1997). U razvoju modela korišćeno je 315 vozila iz 24 različite grupe vozila (po tehnologijama) i na osnovu standardnih ciklusa koji se koriste u SAD (An et al. 1997).

Emisije u svakoj sekundi su modelirane kao proizvod tri komponente: potrošnje goriva, indeksi emisija motora (grama emitovanih/grama goriva) i vremenski zavisne frakcije prolaska kroz katalizator. Model se sastoji od šest modula: (1) potražnja snage motora; (2) brzina motora; (3) odnosa gorivo/vazduh, (4) potrošnje goriva; (5) emisije motora i (6) frakcije prolaska kroz katalizator. Potražnja snage motora je procenjena korišćenjem parametara životne sredine (otpor vazduha i vetra, nagib saobraćajnice, gustina vazduha i temperatura) kao i parametara vozila (brzine, ubrzanja, mase vozila, poprečnog preseka, aerodinamike, opterećenja dodatne opreme vozila, efikasnosti prenosa...). Potražnja snage motora je kombinovana sa drugim parametara motora (izbor stepena prenosa, odnos gorivo/vazduh i oprema za kontrolu emisije) da bi se razvili dinamički emisioni faktori za grupe vozila ili tehnologija (Barth et al. 1996). Model koristi ukupno 47 parametara za procenu emisije vozila na izduvnoj cevi.

U metodama koje se zasnivaju na potrošnji goriva, emisioni faktori su normalizovani na količinu goriva i emisija je izražena u gramima po litru goriva u odnosu na grame po kilometru.

Da bi se dobio ukupni prosečni faktor emisije, prosečne vrednosti za podgrupe vozila su ponderisane učešćem goriva koju koristi svaka podgrupa vozila u ukupnoj potrošnji. Emisija prosečnog vozila u voznom parku se množi regionalnim vrednostima prodaje goriva da bi se izračunale emisije zagađivača (Singer 2000).

Tačnost modela na osnovu potrošnje goriva zavisiće od toga koliko dobro vozila i karakteristike promene brzine iz kojih su izmereni emisioni faktori reprezentuju ceo prostor studije. Tačnost starosne raspodele koja se koristi za faktorisanje emisija vozila iz svake godine je još jedan važan faktor.

### 3.3.3.6 Jednostavni režimski modeli

Jednostavni režimski modeli kategorišu rad vozila u mali broj režima. Za svaki od režima pretpostavlja se da je stopa emisija za određenu kategoriju vozila i zagađivač fiksna, a da se ukupna emisija u toku putovanja, ili na delu puta, izračunava ponderisanjem režimskih emisija zagađujućih materija vremenom provedenim u tom režimu. Na primer, model gradskog drumskog zagađenja

(UROPOL) (Hassounah & Miller 1995) množi broj vozila koja ubrzaju, usporenu, čekaju u redovima ili voze ravnomernom brzinom na bilo kojem segmentu duž puta sa stopama emisija koje se odnose na svaki režim vožnje. Prost pristup je najčešće korišćen za određivanje uticaja mera za kontrolu saobraćaja i poboljšanja rada signala (M. C. Coelho et al. 2009; Frey et al. 2001a; Int Panis et al. 2006).

### 3.3.3.7 Modeli trenutnih emisija

Cilj modelovanja trenutnih emisija je da se mapiraju merenja emisija iz dinamometrijskih testova ili na test klupi. U teoriji, prednosti trenutnih modela obuhvataju sledeće (Ajtay & Weilenmann 2004; Ajtay et al. 2005):

- Emisija se može izračunati za bilo koji profil vožnje koje odredi korisnik modela, a time i novi emisioni faktori mogu da budu izvedeni bez potrebe za daljim testiranjem.
- Modeli uzimaju u obzir dinamiku ciklusa vožnje, pa se može koristiti da se objasne neke od varijabilnosti u emisijama u vezi sa datim prosečnim brzinama.
- Ovi modeli omogućavaju da se emisija prostorno raspodeli, i na taj način imaju potencijal da dovedu do poboljšanja u predviđanje aerogađenja.

Neki trenutni modeli, posebno stariji, definišu odnos potrošnje goriva i/ili emisije vozila u odnosu na brzinu i ubrzanje u toku vožnje, obično u jednom sekundi. Drugi modeli koriste neku vrstu opisa snage motora. Ipak, postoji veliki broj fundamentalnih problema u vezi sa modelima trenutnih emisija. Na primer, veoma je teško izmeriti emisije u kontinuitetu sa visokim stepenom preciznosti, a zatim nije jednostavno da se te vrednosti emisija povežu sa odgovarajućim uslovi u saobraćajnom toku. Tokom merenja u laboratoriji, signal emisije dinamički u zakašnjenju i gubi pikove, a to ga čini teško uskladivim sa uslovima eksploatacije vozila (Ajtay & Weilenmann 2004). Takvi poremećaji nisu u potpunosti uzeti u obzir kod trenutnih modela do nedavno.

Treba uzeti u obzir i korisnika modela. Da bi se primenili modeli trenutnih emisija detaljna i precizna merenja rada vozila i lokacija su potrebna, inače sve potencijalne koristi mogu biti izgubljene. To će verovatno biti prilično teško za

mnoge korisnike modela, pošto su te informacije relativno skupe za prikupljanje. Kao posledica toga, upotreba trenutnih modela je uglavnom bila ograničena na istraživačke zajednice.

#### **3.3.4 Modeli zasnovani na merenjima emisija na vozilu u svakoj sekundi**

Ovi modeli su zasnovani na režimskom pristupu ali iz druge perspektive (Frey et al. 2001a; Unal 2002). Ovaj pristup uzima u obzir promenljivu - specifičnu snagu vozila (VSP - Vehicle Specific Power), koja je identifikovana kao korisna promenljiva za procenu emisija putničkih vozila na benzin. Zasniva se na merenju emisija na vozilu (Frey et al. 2001b; Frey, Unal, Roupail, et al. 2003; Frey & Unal 2002; Frey et al. 2010) i funkcija je brzine vozila, nagiba puta i ubrzanja. Modeli zasnovani na merenju emisije na vozilu u svakoj sekundi koriste relativno velike uzorke ponovljenih merenja radi dobijanja prosečne emisije i intervalima poverenja za prosečne vrednosti. Nakon prikupljanja podataka iz merenja na vozilu i dinamometru, ove informacije se objedinjavaju u razvoju koncepta modelskog pristupa. Ova metodologija je pogodnija za mikroskopske i mezoskopske analize i može biti od značaja za situacije u kojima je ocena emisija potrebna za scenarije manjeg obima, kao što je različiti uticaj kružne i semaforisane raskrsnice (M. Coelho et al. 2009; M. C. Coelho et al. 2009).

Rakha i Ahn su razvili mikroskopski model potrošnje goriva i emisije vozila (Rakha et al. 2004). Ovaj model, poznat i kao VT-mikro, predviđa trenutnu potrošnju goriva i emisiju izduvnih gasova HC, CO, NO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub> pojedinačnih vozila na osnovu njihove trenutne brzine i ubrzanja. Trenutna brzina, ubrzanje i emisija su prikupljeni za osam putničkih vozila i lakih teretnih vozila. Promene brzine i ubrzanja imaju značajan uticaj na potrošnju goriva i emisiju štetnih gasova vozila čije je efekte model trebalo da obuhvati. Matrica definiše emisiju u vezi sa svakim režimom rada motora, a rezultat je ukupan iznos emisije vozila za određenu aktivnost povezanu sa matricom emisija.

Problem ovog pristupa je u tome što su neadekvatno tretirane druge varijable koje mogu da utiču na emisiju, kao što su nagib puta ili korišćenje dodatne opreme u vozilu. Prevazilaženja ovog problema je u korekcionim faktorima, ali i tu postoje



ograničenja, jer se efekat korekcionih faktora obično zasniva na sekundarnim testiranjima koja nisu povezana sa osnovnim modelom (Barth et al. 1996).

Kod metoda režimskog modeliranja zasnovanim na emisionim kartama (snage motora i brzine), testovi emisija u svakoj sekundi se izvode na brojnim tačkama motora uzimajući prosečnu vrednost pri stabilnim uslovima merenja. Ovaj model može da služi za procenu emisija na osnovu snage motora i brzine, efekata ubrzanja, nagiba i korišćenja dodatne opreme. Problem u vezi sa ovim pristupom je nedostatak relacije između emisije, brzine i ubrzanja vozila, odnosno brzine motora i opterećenja motora. Bez poznavanja osnovnih matematičkih odnosa ova metodologija pretpostavlja prostu dvodimenzionalnu linearnu vezu među njima. Zbog teškoća pri merenju, većina matrica brzina/ubrzanje ili mapa emisija imaju ograničen broj popunjenih ćelija, što dovodi do velikog broja ponavljanja navedenog postupka u realnoj primeni. Greška u vezi sa jednom ćelijom ili operativnom tačkom motora se može akumulirati u velike grešaka u konačnim rezultatima (Barth et al. 1996; Ahn 1998).

Ovaj pristup može biti precizniji za predviđanje potrošnje goriva i emisija od modela koji se zasnivaju na prosečnoj brzini vozila ili režimskim emisijama. Modeli razvijeni u ovom istraživanju koriste brzinu i ubrzanje kao ulazne podatke i u tipičnoj primeni, emisije su izlazne veličine iz modela.

Razlozi za razvoj modela trenutnih emisija: nivoi emisija zavise od mnogih parametara, uključujući faktore u vezi sa vozilima kao što su model, veličina motora, tip goriva, tehnološki nivo i pređena kilometraža, kao i eksploatacionih faktora kao što su brzina, ubrzanje, stepen prenosa, nagib puta i spoljašnja temperatura (Barlow et al. 2007a).

#### **4 Izbor emisionog modela**

Razvoj emisionog modela je baziran na podacima o emisijama u svakoj sekundi. Postoje potencijalni problem u obradi trenutnih emisija. Identifikovan je određeni broj potencijalnih izvora grešaka u režimskom modeliranju emisija (Sturm et al. 1998; Joumard et al. 1999; Ajtay & Weilenmann 2004; Ajtay et al. 2005; Weilenmann et al. 2003). U literaturi (Sturm et al. 1998) je prikazan rezime studija koje se odnose na veliki broj izvora grešaka, sa posebnim osvrtom na modele na osnovu brzine i ubrzanja. Aspekti režimskih emisionih modela pokrivaju sledeće:

- Karakteristike saobraćajnog toka pri prikupljanju podataka koji se koriste za kreiranje emisionih matrica. Iskustvo stečeno tokom razvoja raznih emisionih modela ukazuje na to da takvi modeli ne garantuju preciznu procenu emisija rada u uslovima u saobraćajnom toku koji su različiti od onih koji su korišćeni u razvoju. Modeli su često zasnovani na ciklusima "niske dinamike". Mogu se postići precizniji rezultati korišćenjem baza podataka koje opisuju uslove koji se modeliraju.
- Parametri koji se koriste da se opiše rad vozila. Neki modeli definišu emisionu matricu u zavisnosti od brzine i ubrzanja, dok drugi koriste parametre brzine i potrebne snage. Vrednosti ubrzanja se mogu izračunati na više različitih načina korišćenjem podataka o brzinama.
- Širina klasa u emisionoj matrici. Tipični koraci u emisionim matricama su 5-10 km/h za brzinu, 0.1-0.4 m/s<sup>2</sup> za ubrzanje i 1.3-5.0 za potrebnu snagu. Sa manjim koracima, uslovi u saobraćajnom toku modeliranih karakteristika promene brzine vožnje se mogu bolje predstaviti, ali proporcionalno tome, veći broj ćelija emisione matrice će ostati prazan sem ukoliko se širi spektar ciklusa vožnje ne koriste u razvoju modela. Veći raspon klasa omogućava da više ćelija matrice budu popunjene podacima o emisiji, ali se zato gubi na osetljivosti.
- Tip šeme interpolacije. Vrednosti emisija se čuvaju u matrici sa određenom veličinom mreže, a vrednosti u svakoj ćeliji se odnose na niz uslova rada. Šema interpolacije može da se koristi za izračunavanje vrednosti emisije za operativne uslove koji se nalaze u tom opsegu. Način na koji se vrednosti

emisija interpoliraju između vrednosti u matrici može dovesti do različitih rezultata.

Postoje nedostaci u režimskom pristupu modelovanju koje se ne može u potpunosti rešiti kalibracijom emisionih faktora ili strukture modela. Potencijalno, svaki pokušaj poređenja emisija dobijenih pomoću modela i merenja u startu je osuđen na neuspeh usled varijabilnosti emisija uzoraka. Pošto su vozni parkovi toliko veliki, a samo mali deo se može uzorkovati, uvek će doći do većih ili manjih problema, u poređenju modeliranih emisija (na osnovu uzorka vozila) u odnosu na merenje emisija (na osnovu drugog uzorka).

Dodatna poboljšanja režimskih modela su moguća u domenu katalizatora koji se ponašaju kao on/off kontrolni sistemi, a nivoi emisija iz vozila sa katalizatorom su mnogo osetljivija na uslove rada od onih bez katalizatora. Pod specifičnim radnim uslovima katalizator može da radi sa maksimalnom efikasnošću, ali za nešto drugačije uslove efikasnost konverzije može biti nizak. Na primer, merenja na evro1 vozilu su pokazala da pri opterećenju motora većem od 75% (stvarna snaga podeljena sa maksimalnom snagom na datoj brzini motora), trenutna emisija CO može biti 20.000 puta više nego na nižim opterećenjima. Tokom celog ciklusa vožnje na autoputu oko 90% od ukupne emisije CO dogodila se tokom samo 15% vremena. Ova osobina rada katalizatora doprinosi navedenoj osetljivosti (Joumard 1999).

Trebalo bi da se koncentrišu naponi na modeliranje u ekstremnim uslovima rada vozila, posebno za vozila opremljena katalizatorom i ovaj pristup je dalje istraživan u Francuskoj (Barlow et al. 2007a). Međutim, do sada, modeli koje tretiraju odvojeno ekstremne događaje nisu pružili nikakav napredak u preciznosti u odnosu na postojeće modele trenutnih emisija pa čak i u odnosu na modele zasnovane na prosečnoj brzini.

Istraživanje (INFRAS 2004) je pokazalo da uvođenje u modele parametra koji su u vezi sa promenom stepena prenosa može da pomogne da se smanji varijabilnost emisija u ćelijama matrice i zaista je definisanje ponašanja u tom segmentu bilo važan element savremenih modela zasnovanih na snazi (kao što je PHEM).

### *Vremensko usaglašavanje signala i maksimalne vrednosti*

Zbog vremena potrebnog za transport izduvnih gasova do mernog instrumenta i vremena odziva, emisijski signal kasni u odnosu na svoje vreme formiranja (a samim tim i u odnosu na karakteristike u saobraćajnom toku). Iako je ovaj efekat dobro poznat, metode za prevazilaženje ovog efekta se ne pojavljuju u velikoj meri (Weilenmann et al. 2003; Ajtay & Weilenmann 2004).

Obično se kašnjenje tretiralo na način da se izmerene emisije pomere unazad za fiksni vremenski period. Međutim, izduvni gas koji se uzorkuje nije u konstantnom zakašnjenju, a varira više od jedne sekunde u zavisnosti od protoka gasa u izduvnom sistemu. Značajne promene u vremenu kašnjenja javljaju se zbog različite brzine izduvnih gasova. U principu, mali protok gasa pri niskom broju obrtaja motora i malom opterećenju motora izaziva veliko kašnjenje, dok veliki protok pri visokom broju obrtaja i velikom opterećenju motora dovodi do malog kašnjenja (Ajtay & Weilenmann 2004). Varijacije u vremenu transporta gasa su naročito velike kod putničkih vozila sa benzinskim motorima, jer je gas spor u stanjima bliskim ili u stanju mirovanja

Pomeranja celog signala emisije za fiksni broj sekundi jasno znači da su emisije određenih događaja vremenski neporavnati što dovodi do nepreciznosti modela. Tokom vožnje u promenljivim uslovima u saobraćajnom toku, opterećenje motora varira u svakoj sekundi, a samim tim će neminovno biti trenutaka kada se emisija beleži i pre trenutka generisanja same emisije. Vraćanje sirovog signala znači da je u principu, stvarna emisija potcenjena u svojim vršnim vrednostima, a emisije u negativnim ekstremima precenjene. Čak i ako nema stvarne emisije u datom trenutku, model može da proizvede vrednost zbog vremenskog rasipanja pikova emisija (Weilenmann et al. 2001).

Pored toga što kasni, izduvni gasovi se mešaju u izduvnom sistemu i vodu za uzorkovanje tokom transporta do analizatora. To dovodi do opšteg poravnavanja pikova trenutnih emisija, često u periodu dužem od jedne sekunde. Dinamika mešanja i poravnavanja emisija pikova, takođe zavisi od protoka gasa (Weilenmann et al. 2001). Kao posledica toga, emisijski pikovi često ne odražavaju karakteristične uslove u saobraćajnom toku.

Dakle, čak i ako su režimski emisioni modeli izrađeni na osnovu sirovih podataka merenja izduvnih gasova, postoje problemi u poklapanju odgovarajućih emisija sa odgovarajućom kombinacijom brzine i ubrzanja ili snage.

Napredak u oblasti režimski modeliranja emisije neće biti moguć sve dok ne postoje realni kontinuirani podaci o emisijama, a uloženi su napori da se smanji dinamička distorzija podatke o emisijama (Weilenmann et al. 2001; Ajtay & Weilenmann 2004; Ajtay et al. 2005). Određena vrsta kompenzacije mora da se primeni na podacima da bi se poništili efekti kašnjenja i povratile ekstremne vrednosti signala emisije.

U narednim poglavljima su dodatno prikazani neprilagođeni modeli u kojima je mapiranje emisije izvedeno povezivanjem emisija sa uzročnim promenljivim, kao što su brzina i ubrzanje. Nakon toga su opisani neprilagođeni modeli u kojima je mapiranje emisija izvedeno u odnosu na snagu motora. Zatim su predstavljeni i prilagođeni modeli. Sagledavanje različitih modela pomoglo je u odabiru tipa modela koji je rezultat doktorske disertacije.

#### **4.1 Neprilagođeni modeli bazirani na brzini i ubrzanju**

U najjednostavnijim emisionim modelima, emisije su definisane za različite kombinacije trenutne brzine i ubrzanja, obično u matrici ili opseg. Za svaku kombinaciju brzine i ubrzanja emisije se obično zasnivaju na prosečni rezultati merenja na većem broju vozila u različitim ciklusima vožnje. Primeri ovog pristupa mogu se naći u literaturi (Sturm et al. 1998; Sturm & Hausberger 1999).

Neki od prvih primera evropskih modela trenutnih emisija su DGV (Digitised Graz model) (Sturm et al. 1998) i MODEM (Joumard 1999). Ovi modeli su veoma slični po načinu rada.

##### *Modem*

Originalna verzija je proizvedena tokom DRIVE programa Evropske komisije. Laboratorijski podaci prikupljeni od strane različitih evropskih laboratorija predstavljali su osnovu modela. Kroz statističke analize karakteristika eksploatacije vozila u urbanim sredinama, INRETS je razvio set od 14 ciklusa vožnje koji su sprovedeni na dinamometru. Korišćenjem ovih ciklusa, emisije su

merene na uzorku od 150 automobila različitih tipova. Zagađivači su mereni pomoću uobičajenih laboratorijskih analizatora, a brzina vozila je zabeležena sa dovoljnom preciznošću da se omogući izračunavanje ubrzanja (Joumard et al. 1995).

Prva verzija je dizajniran za uslove urbanih saobraćajnih tokova i brzine do 90 km/h. Dodatna istraživanja su omogućila upotrebu za veće brzine. Nedostatak originalnog modela je gruba rezolucija raspona brzine i ubrzanja. Shodno tome, matrica sa finijom rezolucijom je takođe razvijen u narednim verzijama modela (Barlow, 1997).

Modem je zasnovan na principu da količinu emisije određuje potrebna snaga za kretanje, a da snaga zavisi od brzine i ubrzanja. Međutim, za istu uloženu snagu, sporo vozilo će ubrzati po znatno višoj stopi nego brzo vozilo. Iz analize podataka o emisijama, utvrđeno je da su najpogodniji pokazatelji za modeliranje emisija brzina i proizvod brzina i ubrzanja, tj. potrebna snaga (Joumard et al. 1995). Emisione funkcije za određenu kategoriju vozila i zagađivač su definisane u obliku dvodimenzionalne matrice sa kolonama koje predstavljaju intervale brzina, a redovi predstavljaju intervale potrebnih snaga. Finalne emisije u ćelijama matrice su izračunate kao aritmetička sredina svih vrednosti ćelije (prosečna vrednost za sve ciklusa i odgovarajuća vozila) (Joumard 1999).

U drugoj verziji modela, opseg brzina je bio od 0 do 147 km/h sa rasponom klase od 6 km/h ( $\pm 3$  km/h). Potrebna snaga je bila u rasponu od -40 do +30  $\text{m}^2\text{s}^{-3}$  sa opsegom klase od 2  $\text{m}^2\text{s}^{-3}$ . Većina raspodeljenih vrednosti je u niskim vrednostima brzine i proizvoda brzine i ubrzanja što pokriva uslove tipične vožnje (vožnja sa umerenim ubrzanjem i usporenjem) (Barlow et al. 2007b; Barlow et al. 2007a; Barlow et al. 2007c). Ciklusi vožnje koji su korišćeni u radu pokrivaju većinu kombinacija koje potpadaju pod normalnu vožnju.

Pokušaj validacije originalnog modela u odnosu na izmerene emisije u određenom ciklusu vožnje dao je loše rezultate, verovatno usled testiranja na samo dva vozila (Joumard 1999). Zbog velike varijabilnosti u emisijama individualnih vozila, model ne može tačno da predvidi emisije na ovom nivou. Međutim, model u stanju da proizvede dobru procenu emisija za tipične saobraćajni tok na osnovu trenutnih

parametara rada vozila (Joumard et al. 1995). Nadograđeni model, koji koristi izvedene faktore za procenu emisija tokom test ciklusa je pokazao da, iako je bilo malih razlike u procenama u odnosu na originalni model, poklapanje sa izmerenim vrednostima je dosta dobro.

### *DGM*

DGM je jedan od prvih modela za procenu trenutnih emisija. U principu, DGM model je veoma sličan modelu Modem. Model izračunava emisije zagrejanog vozila uz pomoć mapa emisija izraženih u odnosu na brzinu i ubrzanje vozila. Razvijene su tri bazne emisione mape: za vozilo bez katalizatora (ECE 15/04), jedna za benzinsko vozilo sa katalizatorom i jedna za dizel vozilo sa katalizatorom. Korišćenjem ovih osnovnih mapa i sastava voznog parka, model konstruiše prosečnu emisiju mapu, a zatim izračunava CO, HC, NO<sub>x</sub>, PM za odabrani ciklus. Podaci u modelu su dobijeni nizom snimanja emisija na dinamometru korišćenjem specijalnih ciklusa kojima se omogućava pokrivanje svih ćelija emisione matrice. Međutim, sprovedeni su testovi na samo 12 vozila. Podaci za rad u uslovima hladnog starta su bili obezbeđeni nezavisno (Sturm et al. 1998; Sturm & Hausberger 1999). Model je korišćen da bi se proverili efekti mera za umirivanje saobraćaja u Gracu.

## **4.2 Neprilagođeni modeli bazirani na snazi**

Problem u vezi sa matricom brzina/ubrzanja je što se modeli obično zasnivaju na emisijama u stacionarnom stanju, a zanemaruju se emisije u pokretu. Sa modernizacijom motora i sistemi za kontrolu emisija postoje razni načini na koje se mogu pojaviti trenutni efekti na emisije. Varijacije u opterećenju motora i broju obrtaja motora zahtevaju visoku fleksibilnost u kontroli sistema ubrizgavanja goriva. U konkretnom slučaju paljenja smeše varnicom kod vozila sa trostrukim katalizatorom, svako pomeranje od stehiometrijskog sagorevanja proizvodi znatno uvećani efekat na izlazu iz katalizatora. Ostali uređaji kao što su turbo punjači, i njihovo ponašanje, takođe mogu imati značajan uticaj na emisiju. Važno je uzeti u obzir i efekte temperature motora i katalizatora pri promeni opterećenja motora (Pelkmans et al. 2005).

Najveće greške kod modela zasnovanim na matricama brzina/ubrzanje nastaju pri uprosečavanju vrednosti u okviru klase matrice ili pri interpolaciji između klasa. Greške u jednoj klasi se mogu akumulirati u konačnim rezultatima. Za eliminisanje ove vrste grešaka ključno je uspostavljanje ispravne analitičke veze važnih varijabli (Barth, Younglove, et al. 2000).

Koristan pristup u modeliranju emisija uključuje razvoj emisionih mapa u odnosu na fizičku snagu motora. Procenom emisije u odnosu na fizičku snagu motora, efekti na primer, nagiba puta i upotrebe dodatne opreme, kao i brzine i ubrzanja, mogu se uzeti direktno u obzir. Snaga motora obično proizilazi iz kombinacije parametara specifičnih za vozilo i karakteristike promene brzine vožnje koje definiše korisnik.

#### *PHEM*

Projekat ARTEMIS obezbedio je dobar uvid u emisije savremenih vozila. Jedan od glavnih ciljeva ARTEMIS projekta je bio da se razvije model za precizno simuliranje emisionih faktora za sve vrste teretnih vozila za različite karakteristike promene brzine vožnje i za različita opterećenja vozila i nagibe puta. Emisija se procenjuje na osnovu trenutne potražnje snage motora i broj obrtaja motora tokom vožnje (Hausberger et al. 2009). Deo za procenu emisija teretnih vozila ne sadrži korekciju distorzije signala tokom merenja emisije.

Većina modela emisija teretnih vozila koristi sličnu metodologiju koja se zasniva na fizičkoj snazi motora i brzini. Glavni ulazi su karakteristike promene brzine vožnje i opis karakteristika vozila. Za svaku sekundu karakteristične promene brzine vožnje model izračunava snagu na osnovu otpora vožnje vozila i gubitaka kao i stvarni broj obrtaja motora na osnovu prenosnih odnosa i modela promene stepena prenosa. Snaga motora i brzina se onda koriste da se generišu odgovarajuće emisije iz emisionih mapa stacionarnog stanja.

Promena emisija tokom vožnje se uzima u obzir kroz korekzione funkcije kojima se stacionarne emisije u svakoj sekundi prilagođavaju u skladu sa parametrima koji opisuju dinamiku promene brzine vožnje.



Model se može koristiti za simulacije emisija pojedinačnih vozila. Izlazi iz modela su snaga motora, broj obrtaja motora, potrošnja goriva i emisije CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub> i PM u svakoj sekundi, kao i prosečne vrednosti za ceo karakterističan ciklus promene brzine u vožnji.

Funkcije korekcije emisije zagađivača može jako da zavisi od brzine promene opterećenja motora. Efekti promenljivih uslova rada se moraju uzeti u obzir u modelu. Glavni problem u razvoju dinamičke funkcije korekcije je identifikacija parametara koji izražavaju dinamičke aspekte rada i postoji jaka korelacija sa razlikom između izmerene emisije i emisije u tzv. stacionarnom stanju. Višestruka regresiona analiza je korišćena za utvrđivanje odnosa između razlike izmerene i izračunate emisije. Parametri koji daju slične jednačine za sve motore su zatim izdvojene i koristeći ovog skupa jednačina preciznost simulacije je poboljšana za sve motore u skoro svim ciklusima (Barlow et al. 2007a).

Validacija u realnim uslovima je sprovedena korišćenjem podataka dobijenih sa vozila u pokretu i tunelskim istraživanjima. Rezultati emisije CO se razlikuju od -3 do -15% (Barlow et al. 2007c).

#### *VeTESS*

Model je formiran u okviru projekta DECADE. Slično kao i PHEM, u modelu VeTESS se utvrđuju uslovi rada motora na osnovu sila koje na njega deluju. Sile predstavljaju sumu sila potrebnih za ubrzanje, savladavanje uspona, kotrljanje i otpor vazduha. Validacija modela je zasnovana na velikom broju merenja na kontrolnom i nekontrolnim vozilima (Pelkmans et al. 2005). Prihvatljivi rezultati su dobijeni za emisije NO<sub>x</sub> i PM (u rasponu od 10 do 20%). Međutim, određeni način upravljanja ili pojedinačni događaji mogu imati ozbiljan uticaj na emisije proizvedene na putu. Rad katalizatora igra važnu ulogu, jer varira u zavisnosti od stanja motora, spoljnih uslova i stanja samog katalizatora. Takvi faktori utiču na težinu procene emisije za moderne dizel motore i vozila sa trostrukim katalizatorom, a efekti se teško mogu generalizovati za klase motora (Pelkmans et al. 2005).

#### *CMEM*

Opšti cilj četvorogodišnjeg projekta koji je započeo 1995. godine je bio da se razvije i verifikuje emisioni model koji tačno odražava emisione karakteristike putničkih vozila u funkciji rada vozila (Barlow et al. 2007a). Model je u stanju da predvidi emisiju izduvnih gasova u svakoj sekundi, a njegova sveobuhvatnost se ogleda u mogućnosti da predvidi emisiju za širok spektar vozila i tehnologija vozila u različitim stanjima (npr. pravilno funkcionisanje, neispravnost) (Scora & Barth 2006).

Kako je model razvijen u SAD, nije primereno da se u potpunosti primeni na Evropskim voznim parkovima. Ipak, principi koji su uključeni u razvoj modela su svakako interesantni. Glavni cilj modela je da predvidi emisije izduvnih gasova vozila u vezi sa različitim režimima rada vozila. U tom smislu model je bliži jednostavnijim režimskim modelima. Ipak, model prilično detaljno uzima u obzir snagu motora, uključuje različite uslove rada vozila (hladni start i rad zagrejanog vozila), a funkcioniše na nivou koji je sličan kao kod drugih modela za procenu trenutnih emisija.

Pristup se bazira na režimskom pristupu određivanja potrebne snage na osnovu parametarske analitičke prezentacije emisije. To znači da je proces emisije podeljen na komponente koje odgovaraju različitim fizičkim procesima i svaka komponenta se odvojeno modeluje korišćenjem različitih parametara koja su karakteristični. Ovi parametri se razlikuju u zavisnosti od tipa vozila, motora i tehnologije. Većina parametara su lako dostupni (masa, veličina motora, aerodinamički koeficijent otpora), ali neki ključni parametri moraju da se izvedu iz testova koji su znatno manjeg obima nego od generisanja emisionih mapa za širok spektar stanja pri radu vozila (Barth, Younglove, et al. 2000).

Model je deterministički jer je zasnovan na uzročnim parametrima, a ne na statistički izvedenim, koji nisu u vezi sa fizičkim pojavama. Navedene su osnovne karakteristike pristupa koje ga čine atraktivnim (Scora & Barth 2006; Barlow et al. 2007a):

- Upotrebljavaju se svi faktori koji utiču na emisije, kao što su tehnologija vozila, režim rada, održavanje, dodatni uređaji, nagib puta.

- Primenjiv je za sve vrste vozila i tehnologije.
- Može se koristiti kako za aktivnosti vozila na mikro tako i na i makro nivou. Na primer, ako je data aktivnost vozila u svakoj sekundi vožnje model može da predvidi emisije u svakoj sekundi. Ako su definisane prosečne karakteristike aktivnosti vozila kao što su prosečne brzine, maksimalna prosečna brzina i vreme mirovanja model se i dalje može koristiti na osnovu prosečnih zahteva za snagom.
- Lako je uraditi kalibraciju i validaciju. Svaki karakterističan promene brzine vožnje, definisan u svakoj sekundi može se primeniti na model da bi se dobila emisija. Rezultati modeliranja se mogu porediti sa rezultatima merenja i parametri modela se mogu menjati u skladu sa tim.
- Nema ograničenja na emisije za čisto stacionarne događaje i emisija u promenljivim uslovima rada vozila su adekvatnije modelirana.
- Model je transparentan, a rezultati se lako mogu izdvojiti za evaluaciju. Zasniva se na fizičkim principima, tako da su podaci testirani u odnosu na fizičke zakone i greške u merenju mogu da se identifikuju u fazi uspostavljanja modela.

Postoje i neke potencijalne mane ovog pristupa. Postoji potreba za velikom količinom podataka. Veliki broj fizičkih promenljivih moraju da budu prikupljene i/ili izmerene za širok spektar tehnologija vozila i tipova u različitim stanjima. Na primer, modeliranje izuzetno niskih emisija (koji se može javiti u kratkim periodima umerene vožnje) sa visokom preciznošću može jako iskomplikovati model (Barlow et al. 2007b).

Osnovna jedinica modela je pojedinačno vozilo čiji se rad posmatra u svakoj sekundi. Primarni cilj je predviđanje emisije tokom perioda od nekoliko sekundi za reprezentativna vozila u svakoj od kategorija vozilo/tehnologija.

Modeliranje na višem nivou detaljnosti ima ograničenu vrednost iz dva razloga (Barth, An, et al. 2000):

- Na nivou istraživanja u svakoj sekundi mogu postojati velike oscilacije u karakteristikama vožnje, sa velikim kratkoročnim skokovima emisija. Velike

oscilacije u dodavanja i oduzimanja gasa su uobičajene u dinamometarskim testovima koji se oslanjaju na standardne cikluse vožnje, kako vozač usaglašava kretanje vozila sa ciklusom. Informacije o učestalosti i intenzitetu oscilacija promene brzine u uslovima stvarne vožnje nisu lako dostupne, jer zavise od uslova u saobraćajnom toku. Stoga je poželjan neki proces vremenskog uprosečavanja u modelu.

- Drugo, bilo bi teško da se razviju posebne funkcije za sva vozila na osnovu izmerenih parametara koji opisuju ponašanje sistema za kontrolu emisije i motora, uključujući i stanje i kvarove za svako vozilo. Umesto toga, koristi se određivanje karakterističnog vozila u okviru svake vozilo/tehnologija kategorije. Karakteristično vozilo (u svakoj kategoriji) je određeno na osnovu ponderisanih prosečnih emisija svih testiranih vozila u kategoriji. Generički parametri se zatim modeliraju kao deo emisionog modela karakterističnog vozila. Koristeći ovaj generički pristup, dobijene su dobre režimske emisije za karakteristično vozilo.

Svaki podmodel koristi tri dinamičke promenljive (brzinu iz koje se dobija i ubrzanje, nagib puta i upotrebu dodatne opreme) i 55 statičkih pokazatelja kako bi se generisala emisija (Scora & Barth 2006).

### *MOVES*

MOVES2004 je razvijen korišćenjem pristupa odozdo-nagore, uzimajući u obzir potrebe korisnika modela za procenu emisije iz mobilnih izvora i preporuka za poboljšanje modela. Kao rezultat toga, sprovedeni su brojni novi pristupi, uključujući: modelovanje potrošnje energije, N<sub>2</sub>O i CH<sub>4</sub>; korišćenje režimskog modeliranja emisije kao osnove za preciznije modeliranje; modeliranje širokog spektra vozila naprednih tehnologija; eksplicitno modeliranje periodima dugog rada u praznom hodu, oslanjajući se pre svega na podatke o emisijama u svakoj sekundi da bi razvile emisione stope (Frey, Unal, Chen, et al. 2003).

Podaci o emisijama u svakoj sekundi su dobijeni iz različitih izvora, od kojih su neki korišćeni za izvođenje emisionih faktora u odnosu na prosečne brzine koji su inkorporirani u MOBILE6 model. Dodatni podaci su dobijeni od izvora koji nisu u

vezi sa EPA test programa (CARB, CRC, North Carolina State University, University of California...) (Frey, Unal, Chen, et al. 2003).

Sledeća verzija je MOVES2006 sa dopunjenom listom komponenta modela, dodajući HC, CO, NO<sub>x</sub>, PM, otrove, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> i NH<sub>3</sub>. Predviđeno je da će na kraju MOVES2006 zameniti postojeći US EPA MOBILE6 model na bazi prosečne brzine.

MOVES2004 i MOVES2006 modeli će koristiti baze podataka emisija u svakoj sekundi (grama u sekundi). Međutim, u ovim bazama podataka pojedinačne ćelije se baziraju na izračunatoj specifičnoj snazi vozila (VSP) u svakoj sekundi. Dakle, ciklus vožnje (brzina i ubrzanje u svakoj sekundi rada) mora prvo da se pretvori u niz specifičnih snaga. Dakle, poznavanje specifične snage u svakoj sekundi rada, omogućava izvođenje emisije vozila u svakoj sekundi. Sve što je potrebno je odgovarajuća distribucija VSP opsega. Standardni izlaz će biti izražen u gramima po satu.

MOVES2009 omogućava dve vrste podataka: potrošnju energije i emisije. Emisije su izražene u ukupnoj emisiji HC, CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CH<sub>4</sub> N<sub>2</sub>O i ekvivalenta CO<sub>2</sub> (US EPA 2009a).

### **4.3 Prilagođeni modeli**

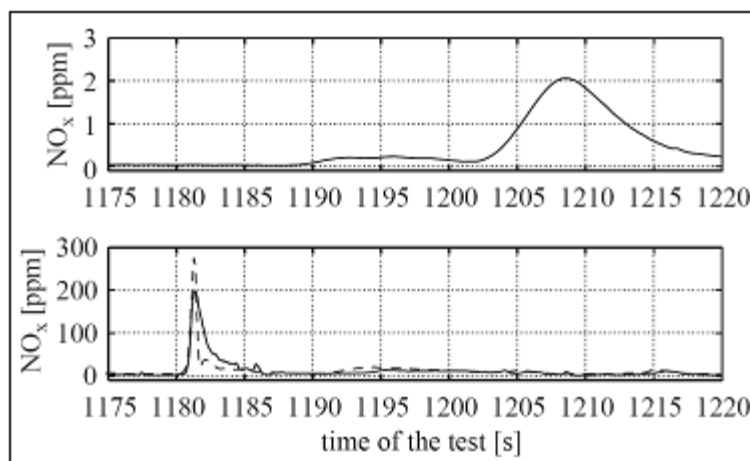
Jedan od osnovnih problema koji se odnose na modeliranje trenutnih emisija je da je izuzetno teško kontinuirano merenje emisija sa visokim stepenom preciznosti, i da vrednosti emisija zabeleženih u kratkim vremenskim intervalima možda neće biti uspešno dodeljene odgovarajućim uslovima rada. Zato se vrši korekcija emisija dobijenih merenjem. Korigovani podaci se koriste za razvijanje „prilagođenih“ modela.

#### *EMPA*

Modeliranje trenutnih emisija savremenih putničkih vozila je sprovedeno u okviru ARTEMIS programa švajcarskog istraživačkog instituta EMPA. Koristeći napredne tehnike merenja i modeliranja, koje se oslanjaju na velikom broju parametara, visokoj frekvenciji merenja i rešavanju nizova diferencijalnih jednačina, moguće je proceniti emisije individualnih vozila u kratkim vremenskim intervalima. Razvijen je matematički model sistema za merenje koji ima mogućnost da u inverznom

procesu rekonstruiše originalni signal emisije u izduvnoj cevi na osnovu onog izmerenog u analizatoru (Weilenmann et al. 2001). Proces postaje komplikovaniji u zavisnosti od nivoa difuzije (promene koncentracije gasa) izduvnih gasova. Najjednostavniji slučaj je kada su emisije zabeležene na izlazu iz motora, složeniji kada je to u izduvnoj cevi i najsloženiji kada se koristi difuzioni tunel. Razvoj novog modela je započet u radovima (Weilenmann et al. 2003; Ajtay et al. 2005).

Na gornjem grafiku (Slika 4-1) je prikazan signal koji je zabeležen na mernom instrumentu. Na donjem grafiku slike, punom linijom je prikazan rekonstruisani signal na osnovu modela dok isprekidana linija predstavlja stvarnu emisiju. Period vršne emisije zabeležene analizatorom traje više od 12 sekundi usled difuzije. Modelom je period vršne emisije svedena na oko 3.5 sekundi, dok je u realnosti ta vrednost oko 1.7 sekundi.



Slika 4-1. Primer rekonstrukcije signala emisije usled kašnjenja (Ajtay et al. 2005)

Prvi korak u razvoju praktičnog modela emisije, emisijski signali su mapirani na klasičan način, u odnosu na brzinu i potrebnu snagu. Korišćeni su podaci u svakoj sekundi kao i u većini starijih modela za putnička vozila. U drugom koraku emisijski signal su mapirani na preciznijem nivou (deseti delovi sekunde) tako što je proces prenosa gasa kroz sistem za uzorkovanje analizatora podeljen na delove koji su posebno modelirani (modelirana transformacija gasa). U trećem koraku, emisije su mapirane korišćenjem istog pristupa u odnosu na normalizovani obrtni moment motora i broja obrtaja motora. Normalizovani obrtni moment motora je koristan za poređenje različitih automobila. Prednost ovog novog sistema

mapiranja je mogućnost uzimanja u obzir uticaja opterećenja vozila i promene stepena prenosa (Ajtay et al. 2005). Da bi se ocenila tačnost modela, emisije izračunata svakim pod modelom za određeni ciklus upoređena je sa izmerenim emisijama. To je učinjeno izborom različitih ciklusa kao verifikacionih ciklusa za nekoliko vozila.

Emisione mape treba proširiti korišćenjem dodatne promenljive koja izražava dinamiku (izvedena iz pritiska ili obrtnog momenta). Vršne emisije HC su izazvane vršnim pritiscima i ne mogu se predvideti na osnovu broja obrtaja motora ili brzine vozila. Još jedan važan element u odnosu na emisione nivoe je ponašanje katalizatora koji ima svoju dinamiku. Uključivanje dinamičke promenljive i modela katalizatora treba da rezultuje poboljšanjem modela (Ajtay et al. 2005).

#### *PHEM (putnički automobil)*

PHEM model za putničke automobile je razvijen kao fleksibilan model za predviđanje trenutnih emisija za svaku pojedinačnu vrstu automobila, kao i za vozne parkove, na osnovu podataka iz ARTEMIS projekta. Potrebno je definisati karakteristike promene brzine vožnje, a može da se uzme u obzir opterećenja vozila, nagib puta i promena stepena prenosa (Zallinger et al. 2005).

Kao i kod dela za teretna vozila, za definisane karakteristike promene brzine vožnje i nagib puta kao ulazne veličine, izračunava se efektivna snaga motora u svakom trenutku na bazi utvrđenih otpora vožnji i gubitaka u prenosnom sistemu. Stvarni broj obrtaja motora se simulira korišćenjem prenosnog odnosa i modela promene stepena prenosa, a emisije se dobijaju interpolacijom emisionih mapa motora. Glavni problem modela je bio pronalaženje odgovarajućeg načina za dobijanje emisionih mapa motora na osnovu merenja na dinamometru. Emisione mape u stanju mirovanja se mogu dobiti sa dinamometra sa dovoljnom tačnošću, ali takva merenja nisu uključena u osnovni test program. Kao rezultat, uspostavljeni metod modeliranja trenutnih emisija je primenjen za određivanje emisionih mapa motora iz testova vozila u promenljivim uslovima rada. Da bi se generisala pouzdanija procena, signali trenutnih emisija su korigovani za vreme kašnjenja analizatora i promenljivo vreme transporta gasa kroz merni sistem (Hausberger et al. 2009).

Pristup korišćen za korekciju signala trenutnih emisija se zasniva na podeli uzorkovanja izduvnih gasova na tri dela koji se odnose na transport, difuziju i odziv uređaja. Transport jedne komponente emisije (HC) je ispitivan pomoću 3-D CFD (computational fluid dynamics) modela. Inverzija prenosa izduvnih gasova modela je sprovedena za svaki od delova sistema. Promenljivo vremensko kašnjenje u izduvnoj cevi definisano je kao stepena funkciji protoka izduvnih gasova. Ova funkcija se pokazala kao jednostavno rešenje, jer se protok izduvnog gasa može izračunati pomoću trenutne emisije i ukupnog protoka. Korišćenjem protoka izduvnog gasa kao promenljive dobija se identična funkcija za sve sisteme uzorkovanja. Samo su koeficijenti u funkciji različiti, a to zavisi od ukupne dužine izduvne cevi za vozila i specifičnosti sistema za uzorkovanje konstantnog protoka. Korekcije su značajno poboljšale kvalitet signala trenutnih emisija, a samim tim i trenutna emisija modela (Zallinger et al. 2005).

Dobijeni podaci o trenutnoj snazi motora, broju obrtaja motora i emisiji izduvnih gasova su zatim korišćeni za kreiranje emisionih mapa motora za model. Vrednosti emisija za emisione mape motora su kreirane za utvrđeni ciklus vožnje korišćenjem metode interpolacije (Zallinger et al. 2005).

#### **4.4 Zaključak izbora emisionog modela**

U okviru rada na doktorskoj tezi, teme koje se tiču izbora modela i istraživanja emisija su blisko povezane. Odlučeno je da Poglavlje: Izbor modela emisije, bude pre Poglavlje: Istraživanja, jer je definisanje tipa modela ključno uticalo na metodologiju i organizaciju istraživanja emisija.

Cilj modela trenutne emisije je precizan opis ponašanja vozila povezujući stope emisija sa trenutnim uslovima u saobraćajnom toku. Modeli trenutnih emisija omogućavaju izračunavanje emisije za bilo koji ciklus vožnje, pa stoga novi emisioni faktori mogu da budu izvedeni bez potrebe za daljim merenjem. Modeli uzimaju u obzir dinamiku vožnje, a mogu da se koriste za objašnjavanje nekih od varijabli emisija povezanih sa prosečnim brzinama. Osim toga, modeli trenutnih emisija omogućavaju da se rešava prostorni aspekt emisija i na taj način imaju potencijal da dovedu do poboljšanja u predviđanju aerozagađenja. Potrebna su detaljna i precizna merenja u različitim uslovima rada vozila i lokacijama, inače sve



potencijalne koristi mogu biti izgubljene. Kao posledica toga, upotreba modela trenutnih emisija je uglavnom bila ograničena na istraživačke zajednice (Barlow et al. 2007a).

Složenost modela trenutnih emisija je porasla tokom poslednjih 20 godina. Neki modeli (posebno stariji), odnose se na potrošnju goriva i/ili emisije u odnosu na brzinu vozila i ubrzanje u toku ciklusa vožnje. Ostali modeli koriste neki oblik zahtevane snage motora. Međutim, postoji veliki broj problema u vezi sa razvojem modela trenutne emisije. Izuzetno je teško merenje emisije na kontinuiranoj osnovi sa visokim stepenom preciznosti, a zatim nije jednostavno dodeliti vrednosti emisija tačnim uslovima u saobraćajnom toku. Tokom merenja u laboratorijskim uslovima, signal emisija dinamički kasni i gubi maksimume, a to otežava usklađivanje signala sa uslovima eksploatacije vozila. Do nedavno, takvi poremećaji nisu uzimani u obzir u modelima trenutnih emisija. Termin "neprilagođeni" je korišćen da označi modele u kojima se ne podešavaju emisije na račun dinamičke distorzije tokom merenja. Nasuprot tome, "prilagođeni" je termin korišćen da se opišu modeli kojima pokušava da se poništi distorzija emisije (Barlow et al. 2007a).

Napredak postoji i kreće se ka preciznom modeliranju emisija iz individualnih vozila na kontinualnoj osnovi, uz akcenat na dobijanje preciznih vrednosti emisija na izduvnoj cevi. Međutim, u smislu primenljivosti modela i dalje postoji čitav niz izazova. Kako se napor koji je potreban za modeliranje emisija iz najnovijih vozila povećava, stvarni nivoi emisija novih vozila i ukupnog saobraćajnog toka se smanjuju. S obzirom na cenu razvoja modela i primene, postavlja se pitanje da li je modeliranje trenutnih emisija isplativo. Pored toga, moguće je da bi proces uprosečavanja za više vozila radi dobijanja reprezentativne procene emisije mogao poništiti poboljšanja tačnosti u vezi sa korišćenjem detaljnijih modela (Barlow et al. 2007a).

Emisije izduvnih gasova vozila zavise od niza tehničkih i eksploatacionih faktora. Nije moguće obuhvatiti sve faktore u isto vreme pa je zato važno identifikovati one koji su najviše povezani sa emisijom. Javlja se iskušenje da se u modele uključuje

mного ulaznih promenljivih. Međutim, važnije je da se odaberu one koje su zaista bitne (Frey et al. 2002).

Hladan start i emisija usled isparavanja mogu biti značajni u ukupnoj emisiji pod određenim uslovima. Vreme vožnje u uslovima hladnog starta i iznos emisija usled isparavanja zavise od ambijentalnih uslova i trajanja parkiranja. Pored toga, period hladnog starta nije dobro definisan u smislu prelaska na emisiju u uslovima ravnomernog rada vozila (Cloke, 1998).

Prema najčešće korišćenim modelima prosečnih brzina (COPERT, MOBILE i EMFAC), emisije su generalno visoke pri malim brzinama u uslovima zagušenja. Emisije opadaju na srednjim brzinama i nižim gustinama saobraćaja. S druge strane, emisije NO<sub>x</sub> su najviše pri velikim brzinama (NRC 2000). Procene zasnovane na modelima prosečnih brzina imaju određene slabosti. Oštra ubrzanja doprinose visokim emisijama. Usled ubrzanja vozilo radi u režimu sa bogatom smešom goriva, pa su potrebni modeli koji koriste ubrzanje kao ulazni faktor za procenu tačne emisije (Ahn 1998).

U okviru sistemskog pristupa u modeliranju, emisioni modeli se smatraju kao alat koji omogućava proračun emisija štetnih gasova na osnovu podataka o saobraćaju na mreži koji su dobijeni iz transportnih modela. Modeli raspodele saobraćaja na mreži i emisioni modeli predstavljaju komponente koje se kombinuju u okviru procesa modeliranja. Ovi modeli su uglavnom razvijeni nezavisno jedan od drugog. Izbor modela emisije može biti težak zadatak definisan sledećim faktorima:

- Ciljevi modeliranja emisija,
- Potrebni ulazni podaci
- Rezolucija
- Osetljivost promenljivih
- Nivo preciznosti
- Ostali faktori.

#### *Ciljevi modeliranja emisija*

Cilj modeliranja emisija je razvoj emisionih mapa i modela kojima je moguće okarakterisati emisije konkretnog voznog parka. Tu se pre svega misli na stvaranje

potencijala za precizno definisanje lokalno specifičnih emisija, pošto je slučaj da se u svim saobraćajnim analizama koriste podaci o emisijama koji su prikupljeni u razvijenim zemljama. Na taj način, se suštom primenom prisvojenih emisioh stopa mogućnosti analize i ocene svode na relativnu ocenu različitih varijanti politika smanjenja emisije. Cilj je formiranje baze podataka o emisijama koja je primenljiva u našim uslovi za apsolutno kvantifikovanje nivoa emisija na što preciznijem mogućem nivou.

Na osnovu ovako definisanih ciljeva, odlučeno je i da se razvija režimski model koji definiše emisije u zavisnosti od brzine i potrebne snage. Razmatrane su samo emisije u uslovima rada zagrejanog vozila.

#### *Potrebni ulazni podaci*

Obim podataka koje treba prikupiti i obraditi za potrebe modela za procenu emisije su u funkciji složenosti emisioh modela (složeniji model zahtevaju veću količinu podataka). Ulazni podaci treba da sadrže dovoljno podataka da bi se obezbedio prihvatljiv uzorak u svim kombinacijama brzina i potrebnih snaga. U tom smislu u prikupljanju podataka postoje ograničenja kojima se redukuje količina potrebnih podataka na prihvatljiv nivo. O tome će biti više reči u okviru organizacije istraživanja.

Ulazni podaci obuhvataju sve dostupne tipove raznorodnih informacija. To su podaci o uslovima u saobraćajnom toku, odnosno ponašanju vozača koje je definisano trenutnim brzinama i ubrzanjima. Zatim, postoje podaci o trenutnim emisijama glavnih zagađivača kao i drugih produkata koji se emituju. Potrebni su i podaci o karakteristikama saobraćajne mreže kao i podaci o ambijentalnim uslovima.

Ovi ulazni podaci se prikupljaju primenom i prilagođavanjem merne instalacije radu u dinamičkim uslovima, a kombinacijom uređaja za merenje emisija i GPS-a. Određeni broj podataka izveden je na osnovu snimljenih podataka.

#### *Rezolucija*

Rezolucija modela utiče na mogućnost upotrebe modela na različitim nivoima, od nacionalnog, regionalnog do gradskog i lokalnog nivoa saobraćajne mreže.

Hijerarhija emisionih modela je definisana u odnosu na prostornu i vremensku rezoluciju. Najsloženiji modeli emisija predviđaju emisije na najnižem prostornom nivou (saobraćajnice) i sa vremenskom rezolucijom tipično na nivou jedne sekunde, dok najmanje složeni modeli funkcionišu na nivou celokupne mreže i dužih vremenskih perioda (npr. čas).

Rezolucija modela zavisi od rezultata prikupljanja podataka o emisijama. Procena emisije u svakoj sekundi zahteva precizna merenja emisija. U disertaciji su prikupljeni podaci u svakoj sekundi merenja. Tako je omogućeno uopštavanje i agregiranje podataka radi stvaranja makro i mezo modela.

Za formiranje kompletnog emisionog modela, odnosno modela koji uključuje sve klase vozila, potrebno je proceniti emisiju celokupnog saobraćajnog toka. S obzirom da je za takav posao neophodno prikupiti jako veliku količinu podataka za predstavnike svih klasa vozila koja su prisutna u saobraćaju, model je sveden na metodološku razradu formiranja modela za jedno vozilo (koje može biti reprezent jedne klase vozila).

#### *Osetljivost i nivo preciznosti promenljivih*

Emisioni model treba da bude osetljiv na elemente koji su relevantni na nivo emisije. Poseban cilj je utvrđivanje relevantnih promenljivih koje treba da budu uključene u model. Veća složenost modela uslovljava veću osetljivost na uticajne faktore, što bi trebalo da uslovljava veću preciznost. S druge strane, osetljivost u odnosu na veći broj faktora će takođe stvoriti dodatnu neizvesnost jer svaki od ulaznih podataka utiče sopstvenom neizvesnošću.

Čest je slučaj sa modelima da su rezultati u dovoljnoj meri osetljivi samo na podskupu svih mogućih ulaznih podataka. Nije neophodno, korisno ili praktično obuhvatiti sve moguće ulazne podatke (Frey et al. 2002). Kompleksnost, agregiranje i isključivost podataka su važni pri formiranju modela. Model treba da ima jasan cilj po pitanju kvaliteta i jasne kriterijume za željeni domen primenljivosti. Domen na kome model važi idealno bi trebalo da odgovara domenu za koji je željeni model formiran (Frey et al. 2002).

Složenost modela karakteriše se brojem članova ili stanja zastupljenih u modelu, brojem ulaznih parametara i obliku jednačine. Složenost i veličina su dva različita pitanja. Model može biti velik ali jednostavan tako što se sastoji od velikog broja ulaza ali ima linearnu funkcionalnu zavisnost. Model može da bude mali i složen, jer može biti vrlo nelinearna zavisnost sa brojnim interakcijama između parametara. Kompleksni sistemi su često hijerarhijski, i mogu se opisati u obliku raspona svakog nivoa u hijerarhijskom nizu i broja nivoa. Jednostavan model može da ima parametre koji se ponavljaju na samo jednom nivou. Generalno se veruje da su jednostavni modeli ograničeniji u primenljivosti nego složeni modeli. Na primer, ako je jednostavan model je lokalna linearna verzija složenog modela, onda će taj model obezbediti tačne prognoze u blizini određene tačke ali će se tačnost procene smanjivati kako se model primenjuje dalje od tačke kalibracije (Frey et al. 2002).

Postoje razni kompromisi između jednostavnosti i složenosti u modelima i tako nešto treba priznati i raditi svesno. Kompleksni modeli su često generisani u naučne svrhe dok jednostavniji modeli imaju širu upotrebu (Frey et al. 2002).

Kompleksni modeli mogu biti tačniji od jednostavnijih modela. Tačnost se odnosi na konvergenciju prosečnih predviđanja modela ka stvarnoj vrednosti. U kretanju od jednostavnih do složenijih modela, neizvesnost usled strukture modela može biti smanjena. Međutim, neizvesnost u vezi sa većim brojem ulaznih parametara ili sa njihovim kumuliranjem grešaka usled neizvesnosti u kompleksnim modelima može dovesti do gubitka preciznosti (Frey et al. 2002).

Za svrhe realnog upravljanja sistemom postoji stav da "modeli treba da budu što je moguće jednostavniji ali ne jednostavniji od toga" (Morgan & Henrion 1990). To znači da modeli ne bi trebalo da sadrže suvišne parametre koje nemaju uticaja na stvarnu primenu modela. Npr. ako će se model koristiti za razvoj režimskih ili emisija na makro nivou koje se odnose na prosečne vrednosti voznog parka, onda može biti irelevantno uključiti suviše detalja u vezi dizajna pojedinačnog vozila u ulaznim podacima. Međutim, to ne znači da ih ne treba uzeti u obzir u procesu izrade modela. To samo znači da će konačni model biti odgovarajućeg nivoa složenosti u skladu sa njenom namenom. Npr. kompleksan, detaljni fizički model mogao bi u početku da daje osnovni uvid u vezi ključnih odnosa koje treba očuvati

u konačnom modelu. Ovo se može postići korišćenjem prilagođenih, izvedenih parametara koji su dostupniji (lakše se mere) (Frey et al. 2002).

Razne metode analize osetljivosti, kao što je tehnika odgovarajućih površina, mogu se koristiti da se identifikuju ključne relacije u kompleksnim modelima koje treba da bude sačuvane u pojednostavljenim verzijama modela namenjenim za širu upotrebu (Frey et al. 2002).

U razvoju modela prihvaćen je princip da se formira što jednostavniji model koji će imati praktičnu upotrebnu vrednost. U disertaciji je formiran model za procenu emisija na mikro nivou koji se zasniva na prosečnim vrednostima emisije za određene režime kretanja. Istražene su mogućnosti razvoja korekcionni faktor emisija u procesu razvoja preciznijeg modela.

## **5 Istraživanja emisija vozila**

Mnoge studije procena emisija su sprovedene na osnovu: laboratorijskih testiranja na dinamometru, merenjima na vozilima u pokretu i daljinskog očitavanja kao i kombinovanja ovih metoda istraživanja. Često se ispituju emisije vozila u odnosu na postojeće modele sa svrhom validacije i kalibracije. Većina istraživanja se bave utvrđivanjem aktivnosti vozila koja utiču na emisije. Teži se da se omogući definisanje parametara koji utiču na odnos brzine, potrebne snage i emisije. Tako je definisan jedan od ciljeva istraživanja u okviru doktorske teze: formiranje baze podataka koja će omogućiti definisanje odnosa ova tri parametra za konkretne uslove saobraćajnom toku i različita vozila. Ova baza je iskorišćena za formiranje režimskog modela.

### **5.1 Metodologija istraživanja**

Metodologija istraživanja definiše sve elemente istraživanja u logičkom nizu počevši od ciljeva i zadataka istraživanja do objašnjenja svakog pojedinačnog elementa metodologije.

Ciljevi istraživanja su bili razvoj i demonstracija pristupa za merenje režimskih emisija. Osnovni zadatak je razvijanje merne instalacije za registrovanje podataka o uslovima u saobraćajnom toku i trenutnim emisijama tako da je moguće definisanje emisija u različitim režimima.

Specifičnosti zadatak su definisane zadacima nižeg nivoa:

- Formiranje merne instalacije
- Prikupljanje baze podataka za analizu
- Definisanje i eliminisanje grešaka u prikupljanju podataka
- Prevazilaženje grešaka usled odziva mernih uređaja
- Skladištenje podataka

Na osnovu pregleda literature postavljene su hipoteze u vezi sa: pristupima za izbegavanje greške prilikom prikupljanja podataka, jedinicama u kojima će biti definisani elementi emisijih mapa i načini za korekciju podataka. Postavljanje hipoteza je omogućeno davanjem odgovora na sledeća pitanja:

- Na koji način redukovati greške u prikupljanju podataka
- Koliko detaljno treba agregirati prikupljene podatke
- Koju bazu podataka treba koristiti za konačnu verziju modela
- Koje metoda uprosečavanja je poželjna kao osnova za razvoj modela
- Koje jedinice emisionih faktora treba da se koriste
- Na koji način ekstrahovati podatke iz emisione mape za dobijanje emisija na osnovu načina vožnje
- Varijabilnost i neizvesnost
- Mogućnosti kalibracije i validacije podataka i modela

Fokus istraživanja je bio na formiranju baze podataka o emisijama tako da se obuhvati što više raznorodnih podataka koji mogu imati veze sa trenutnim emisijama vozila u pokretu. Vodilo se računa i o mogućem generisanju podataka iz drugih izvora i njihovo priključivanje bazi podataka za generisanje modela.

Procenjena je neizvesnost podataka i varijabilnost u procenama emisija na osnovu stepena agregacije podataka. Definisane su mogućnosti za potvrdu rezultata koji su dobijeni razvijenim pristupom.

Opšta metodologija saobraćajnih istraživanja (Jović 1996) je korigovana za primenu u disertaciji i sadrži nekoliko stavki :

- Kalendar istraživanja
- Vremensku obuhvatnost
- Teritorijalnu obuhvatnost
- Definisanje uzorka
- Metod istraživanja
- Formiranje merne instalacije
- Obuku za rad
- Testiranje procedure prikupljanja podataka
- Definisanje načina obrade

U konkretnom istraživanju veliki uticaj je imao izbor modela trenutnih emisija, što je uslovalo razvoj merna instalacija za prikupljanje potrebnih podataka. Značajan deo disertacije je usmeren na stvaranje mogućnosti za formiranje baze podataka



na nivou svake sekunde. Takva baza podataka omogućava buduća istraživanja u mnogim poljima u vezi sa uspostavljanjem modela o zavisnosti saobraćajnih pokazatelja i emisija kao i pouzdanošću, preciznošću i dinamičkim karakteristikama podataka.

### **5.1.1 Prostorni i vremenski obuhvat i uzorak**

*Kalendar istraživanja.* Istraživanja su obavljena u julu i avgustu 2012. godine. Reprerentativnost odabranih meseci po pitanju obima i strukture saobraćaja nije od velikog značaja s obzirom da se istraživanje sprovodi na uličnoj saobraćajnoj mreži gde su neravnomernosti izražene na dnevnom nivou. Jedini kriterijum je bio prikupljanje dovoljnog broja podataka u svakoj sekundi za sve kombinacije brzina i potrebnih snaga. Vožnja u ovom sezonskom periodu omogućila je da se minimizira uticaj saobraćajnih zahteva na broj prikupljenih podataka po parovima promenljivih, već je on pre svega zavisio od odabira trase kretanja. Tako je vožnja opterećenijim i saobraćajnicama nižeg ranga omogućavala snimanje emisija pri manjim brzinama, dok su se emisije pri većim brzinama beležile na slabije opterećenim saobraćajnicama. Emisione karakteristike vozila variraju od spoljne temperature i ambijentalnih koji u ovom periodu znatno utiču na stanje u kome se motor nalazi pri radu (radnu temperaturu). Ovaj period istraživanja je pogodan jer obuhvata čitav temperaturni opseg rada motora. Za procenu emisija u zimskim uslovima potrebna su dodatna istraživanja.

*Vremenska obuhvatnost.* Vremenski period istraživanja u toku dana je obuhvatao vožnje u trajanju do 90 min koje su realizovane u vršnim i vanvršnim periodima saobraćajnog opterećenja. Uzorci su prikupljeni pretežno u period od 7 do 9h. Značaj vremena prikupljanja podataka nije velik s obzirom na prethodnu konstataciju u vezi sa odabranim mesecima istraživanja.

*Teritorijalna obuhvatnost.* Usled ograničenja u resursima i zahtevnosti istraživanja po količini podataka, nije bilo moguće prikupiti kompletan set podataka za celo urbano područje. Istraživanje je svedeno na prikupljanje podataka za saobraćajnice na kojima nema uzdužnog nagiba. Trase istraživanja su definisane tako da se obezbedi zastupljenost svih kategorija primarne ulične mreže (auto-

puteva, magistralnih, primarnih i sekundarnih saobraćajnica), radi dobijanja dovoljnog broja podataka o emisijama (Slika 5-1).



Slika 5-1. Trasa istraživanja – primer jedne vožnje

Gradski auto-put je glavni urbani koridor i međusobno povezuju velike urbane celine. Vođenje tranzitnog teretnog i putničkog saobraćaja se primarno ostvaruje na auto-putskim deonicama ulične mreže pa se režimskim i regulativnim merama daje apsolutni prioritet u odnosu na ostale kategorije. Karakteristike ove kategorije su najviša dozvoljena brzina kretanja ali i neprekinut saobraćajni tok sa minimalnim ometanjima. Ova kategorija saobraćajnice je uključena u saobraćajna istraživanja radi snimanja karakteristika emisija pri brzinama od 60 do 90 km/h.

Magistralne saobraćajnice obezbeđuju povezivanje između zona različitih gradskih sadržaja. Primarna im je uloga u vođenju linija JMTP-a i ostalih vidova transporta i režimskim i regulativnim merama su u prioritetu u odnosu na funkcionalno niže rangove. Karakteristike magistralne mreže su: više od jedne trake po smeru (odvojeni smerovi ili ne), koordinisani rad svetlosnih signala, veće brzine kretanja (često i preko ograničenja), veliki kapacitet, zabrana parkiranja. Na magistralnoj mreži su snimljene emisije karakteristike tokova pri brzinama od 50 do 60 km/h.

Primarne saobraćajnice povezuju veće stambene zone međusobno, sa centralnim područjem grada i ostalim značajnijim gradskim aktivnostima. Ostvaruju kontakt između magistralne i sekundarne saobraćajne mreže. Mogu da imaju više traka po smeru, potencijalno je dozvoljeno parkiranje i nisu obavezno odvojeno vođenje levih skretanja. Na primarnim saobraćajnicama se ostvaruju manje brzine kretanja nego na magistralama. Na ovoj kategoriji saobraćajnica su snimljene emisione karakteristike pri brzinama do 40 do 50 km/h.

Sekundarne saobraćajnice su najniža kategorija osnovne saobraćajne mreže koje omogućavaju neposredno opsluživanje sadržaja zona stanovanja, rada i centara. Obično imaju niže brzine (ograničenja na 30 ili 40 km/h) sa čestim ukrštanjima sa drugim saobraćajnicama. Značajno je prisustvo parkiranja i pešaka. Na sekundarnim saobraćajnicama su snimljene emisione karakteristike za brzine manje od 40km/h.

Realne brzine saobraćajnog toka su često veće od maksimalnih dozvoljenih brzina kretanja. Opšte ograničenje brzine kretanja u urbanim sredinama na 50 km/h često nije u skladu sa tehničko-eksploatacionim karakteristikama saobraćajnica, naročito na saobraćajnicama višeg ranga (magistralnim i primarnim). Snimanje karakteristika promene brzine u realnim uslovima u saobraćajnom toku je u vezi sa ponašanjem vozača. Praćenjem uslova u saobraćajnog toka snimljene su realne brzine kretanja vozila. Na definisanim kategorijama saobraćajnica postoje preklapanja snimljenih brzina u saobraćajnom toku.

Skup međusobno povezanih magistrala i stambenih ulica je odabran tako da se nadovezuju i formiraju kružni put da bi se obezbedila efikasna deonica za istraživanje.

### **5.1.2 Metod**

Istraživanja u disertaciji su obuhvatala petnaestodnevna snimanja podataka o karakteristikama rada vozila i karakterističnim emisijama u svakoj sekundi. Emisije drumskih vozila znatno variraju u zavisnosti od tri grupe faktora: tipa vozila, načina vožnje i lokalnih geografskih i klimatskih uslova (Davis et al. 2005). S

obzirom da je istraživanje rađeno za potrebe doktorske disertacije određena uopštavanja su morala svesno da se prihvate.

Sva merenja su izvršena na jednom test benzinskom vozilu čija je veličina motora 1.6 litara, ima 4 cilindra, težinu (prazno vozilo) 1050kg. Tehnologija vozila je pre ECE standarda, bez katalizatora. Kvalitet goriva je pokazatelj koji neće biti uzet u obzir analitički ali predstavlja važan element koji utiče na lokalne specifičnosti emisije. Vozilo je proizvedeno 1992. godine i prešlo je oko 230000 kilometar. To ga svrstava u kategoriju velikih zagađivača u okviru čitavog voznog parka (Institut saobraćajnog Fakulteta/ISF 2010).

Istraživanje nije obuhvatilo razlike usled karakteristika vozača. Celo istraživanje je sprovedeno sa istim vozačem. Karakteristike promene brzine su bile prilagođene uslovima u saobraćajnom toku slično principima istraživanja u metodi pokretnog posmatrača. Ipak, izbegavana su nagla ubrzanja i usporenja. Pristupom utvrđivanja emisija, a na osnovu ograničenja koja su postavljena u istraživanju, utvrđivane su karakteristike emisija vozila u uslovima umerene vožnje. Uslovi umerene vožnje podrazumevaju odsustvo naglih ubrzanja i usporenja u toku vožnje i to je najčešći način na koji se vozači ponašaju u saobraćaju.

Prikupljeni su podaci o vremenu merenja i poziciji vozila koja je definisana latitudom, longitudom i altitudom u svakoj sekundi. Podaci o poziciji vozila su omogućili povezivanje sa GIS-om i generisanje dodatnih relevantnih podataka. Promena visine omogućava definisanje nagiba saobraćajnice, što je važan element koji utiče na količinu emisiju. GPS uređaj obezbeđuje podatke o trenutnim brzinama u svakoj sekundi kretanja iz čega su direktno izvedeni podaci o trenutnom ubrzanju. Na osnovu podataka o načinu kretanja generisani su podaci o potrebnoj snazi.

Prikupljeni su i podaci o temperaturama, ambijentalnoj i temperaturi izduvnog gasa. Iz tih podataka su izvedeni dodatni pokazatelji koji su u vezi sa temperaturnim gubicima. Razlike u ambijentalnim uslovima u toku istraživanja značajno utiču na razlike u emisijama. Statističkom analizom podataka utvrđena je veza između ambijentalnih uslova i emisija koja je definisana i u literaturi (Guo et al. 2007). Da bi se smanjila mogućnost uticaja promene vremena na rezultate

istraživanje odabran je kraći vremenski period sa stabilnim vremenskim uslovima (15 dana u julu) sa dodatnim istraživanjima u avgustu (3 dana).

Osnovni podaci koji su predmet istraživanja su emisije različitih zagađivača (pre svih CO, NO<sub>x</sub> i HC) kao i gasova koji čine izduvni gas vozila (CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>) na izduvnoj cevi u svakoj sekundi. Glavni problem koji je savladan je konverzija jedinica u kojima se emisije izražavaju. Uobičajena jedinice u kojima se merni uređaji beleže emisije su ppm/ppb<sup>3</sup> i mg/m<sup>3</sup>. Upotrebom Pitove cevi omogućena je transformaciju u mg/s. Svi navedeni podaci su prikupljeni korišćenjem instalacije koja je razvijena u samostalnom radu.

Od svih pristupa prikupljanja podataka o emisijama, on-board merenja su ona koja pokazuju najviše potencijala. Iako postoje ograničenja, on-board merenja omogućava prikupljanje reprezentativnih, realnih podataka na svakom mestu i u svim vremenskim uslovima, čime se prevazilaze mnogi nedostaci laboratorijskih metoda i merenja na terenu metodama kao što su daljinsko očitavanje i tunelske studije, koji su ograničeni lokacijom istraživanja. U isto vreme, usled prirode prikupljanja podataka, nije moguće da se prikupe podaci pod kontrolisanim uslovima kao u laboratoriji. Dakle, tu će i dalje biti važna uloga prikupljanja podataka iz više izvora (Frey et al. 2002).

Američka Agencija za zaštitu životne sredine (EPA) je predložila nekoliko pristupa za procenu emisije (US EPA 2001).

1. Upotreba podataka visoke frekvencije (npr. podaci u svakoj sekundi) za procenu emisija na mikro nivou, sa mogućnošću agregiranja na mezo nivou i makro nivou (npr. prosečne emisije). Potrebna je veoma velika količina podataka.
2. Upotreba statističkih metoda za obradu sirovih podataka za generisanje procene na mezo i makro nivou.

---

<sup>3</sup> ppm/ppb - parts per million/bllion – čestica u milion/milijardu čestica gasa

3. Razvoj opsežnog seta podataka i korišćenje programa za procenu emisija da bi se jednostavno iz baze izvukla procena emisije.

Sva tri pristupa su validna i u nekim slučajevima se preklapaju. U disertaciji se koriste pristupi 1 i 2. Prikupljeni podaci na nivou svake sekunde su klasirani na osnovu definisanih opsega da bi se formirale matrice srednjih vrednosti emisija pri različitim kombinacijama brzine i potrebne snage. Procena emisija je dobijena poklapanjem prikupljenih srednjih vrednosti sa modelskom površinom upotrebom regresione metode najmanjih apsolutnih razlika. Ovom metodom se minimiziraju apsolutne razlike ostataka tako da ekstremne vrednosti imaju manji uticaj na modelsku površinu u odnosu na uobičajenu metodu najmanjih kvadrata.

### 5.1.3 Merna instalacija

Merna instalacija je bazirana na integraciji mernog uređaja za prikupljanje podataka o karakteristikama emisija (Vario+ merna jedinica) i podataka uslovima u saobraćajnom toku (GPS uređaj) u svakoj sekundi. Merenje koncentracija gasova se zasniva na elektro-hemijskom principu ili opciono za veće vrednosti, na NDIR metodi (princip infracrvenih zraka). Vario+ omogućava prikupljanje podataka koji su prikazani u narednoj tabeli (Tabela 5-1).

Tabela 5-1. Gasovi i opsezi merenja za Vario+ u zavisnosti od principa merenja

Elektrohemijski		
Gas	Opseg	
O <sub>2</sub>	0 ... 21 %	
CO	0 ... 2.000 ppm ( * do 10.000 ppm)	
NO	0 ... 1.000 ppm ( * do 5.000 ppm)	
NO <sub>2</sub>	0 ... 200 ppm ( * do 1.000 ppm)	
SO <sub>2</sub>	0 ... 2.000 ppm ( * do 5.000 ppm)	
H <sub>2</sub> S	0 ... 50 ppm ( * do 500 ppm)	
H <sub>2</sub>	0 ... 1 % ( * do 2 %)	
Infra crveni		
Gas	Opseg	Opciono
CO	0 ... 10.000 ppm / 30.000 ppm	0 ... 3 % / 10 %
CO <sub>2</sub>	0 ... 3 % / 20 %	0 ... 3 % / 30 %
CH <sub>4</sub>	0 ... 10.000 ppm / 30.000 ppm	0 ... 1 % / 3 %

\*najveće kratkotrajne vrednosti

Dodatno su registrovane temperature (izlaznog gasa i ambijentalnog vazduha) i brzina izlaznog gasa. Brzina izlaznog gasa se meri upotrebom Pitove cevi (Pitot tube). Tako je omogućena transformacija emisija izraženih u ppm i mg/m<sup>3</sup>, u g/s. Brzina izduvnog gasa je izražena u m/s. Na osnovu raspoloživih podataka automatski se proračunavaju sledeći podaci (Tabela 5-2).

Tabela 5-2. Računske veličine i jedinice uređaja Vario+

Računske veličine	jedinice
CO	[ppm], [mg/ref%O2], CO [ppm], [mg/ref%O2]
CO2	[%]
Izlazni kiseonik (Lambda)	[]
Efikasnost sagorevanja	[%]
Temperaturni gubici (Losses)	[%]
Tačka rose (Dew point)	[°C]
NO	[mg / ref%O2], [mg/m3],[mg/kWh],[mg/M]
NO(x)	[mg / ref%O2], [mgNO2/m3], [mg/kWh], [mg/M]
SO2	[ppm], [mg / ref%O2], [mg/m3]
CO/CO2 odnos	[]

Količina emitovanog gasa je izračunata kao proizvod brzine gasa ( $V_{gas}$ ) i površine poprečnog preseka izduvne cevi ( $P$ ) ( 2 ). Promer izduvne cevi je određen na osnovu poluprečnik poprečnog preseka i iznosi oko 0.002 m<sup>2</sup>.

$$Q_{gas} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = V_{gas} \left[ \frac{m}{s} \right] \cdot P [m^2] \quad (2)$$

S obzirom da se svi podaci prikupljaju sa vremenskim korakom od 1 sekunde moguće je transformisati emisiju na taj nivo, odnosno predstaviti je u mg/s. Da bi se proračunala emisija određene štetne materije u utvrđenoj količini gasa koristi se sledeća jednačina ( 3 ).

$$Emis \left[ \frac{mg}{s} \right] = Emis \left[ \frac{mg}{m^3} \right] \cdot Q_{gas} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (3)$$

Rad instalacije u vozilu u pokretu je omogućen obezbeđivanjem stabilnog napajanja, skladištenja podataka i adaptacije vozila.

Stabilno napajanje je obezbeđeno upotrebom zatvorenog akumulatora na bazi olovne kiseline (SLA – Sealed Lead Acid) (Slika 5-2 – pozicija 1). Ovaj tip akumulatora ima mogućnost velikog broja potpunih pražnjenja. Kapacitet baterije je odabran da obezbedi pun radni kapacitet za bar 2 sata. Napajanje je neophodno za topli vod koji služi za uzorkovanje gasa koji se greje na temperaturu preko 100°C (Slika 5-2 – pozicija 2) i za sam uređaj (Slika 5-2 – pozicija 3). Potrošnja baterije je redukovana tako što je topli vod zagrevan u fazi pripreme merenja kada je uređaj povezan na glavnu naponsku mrežu (220V). Paralelno se obavljao i proces vraćanja senzora na nulto stanje (čišćenje senzora ambijentalnim vazduhom koje se obavlja pre svakog merenja). Konverter napona (DC/AC konverter koji transformiše jednosmernu struju u naizmjeničnu) (Slika 5-2 – pozicija 4) je instaliran da bi se obezbedio stabilan napon od 220V.



Slika 5-2. Merna instalacija u vozilu

Skladištenje podataka je obezbeđeno u samom uređaju čija interna memorija omogućava zapis 8500 nizova podataka. On-line prikaz podataka tokom merenja (korišćenjem RS232 protokola) je sporo i uzrokuje gubitak podataka, tako da prosečno svaki šesti podatak može biti zabeležen.

Prilagođeno je i vozilo za merenje. Prikazane su pozicije Pitove cevi (Slika 5-3 – pozicija 1) i sonde za prikupljanje emisija (Slika 5-3 – pozicija 2). Sonda je



postavljena i u sredini i normalno na izduvnu cev tj. na tok izduvnog gasa. Pitova cev je postavljena nakon sonde i malo dalje tako da pozicija sonde ne remeti tok izduvnog gasa.



Slika 5-3. Pitova cev i sonda (pogled iz i van vozila)

Bitna podešavanja u okviru Vario+ uređaja odnose se na:

- Podešavanje vrste goriva: iz uputstvu se bira slično gorivo koje postoji u Engleskoj jer od Standardnog goriva zavise jezuk na kome uređaj komunicira. Eventualno se može iskoristiti Slovenački standard.
- Podešavanje površine poprečnog preseka. Za cev od prečnika 5cm površina je 0.002 m<sup>2</sup>, (ako ne postoji tačno izmerena vrednost koristiti minimalnu vrednost 0.001 m<sup>2</sup>)
- Pre početka merenja obavezno je izjednačiti pritisak sa spoljnim. Od toga zavisi tačnost merenja brzine gasa koje se zasniva na principu razlike u pritiscima. Posledično, dobija se tačna vrednost emitovane količine gasa, a samim tim i količine zagađujućih materija.
- Postaviti granicu za maksimalnu vrednost emisije CO koja se meri elektrohemijским senzorom. Elektrohemijški nominalno radi na 4000ppm sa maksimalnim vrednostima do 10000ppm (1%), infracrveni sa vrednostima do 10% (realne vrednosti do 9%). Standardno podešavanje je na 2000ppm radi dužeg trajanja elektrohemijških senzora.
- Podešavanje online praćenja rezultata merenja na monitoru čime se omogućava stalna kontrola rada.

Uređaj sam proračunava određeni broj pokazatelja koji su izvedene veličine iz osnovnih koje se utvrđuju direktnim merenjem. U nastavku su prikazane relacije koje se koriste za utvrđivanje ovih pokazatelja.

Karakteristike sagorevanja su izračunate po Sigertovim formulama.

Emisija ugljen-dioksida je izračunata po formuli u odnosu na izmerenu količinu kiseonika ( 4 ).

$$CO_2 = CO_{2max} \cdot \left(1 - \frac{O_2}{21,0}\right) \quad (4)$$

Kiseonik u izduvnim gasovima je mera sastava smeše vazduha i goriva koju koristi motor. Koeficijent Lambda ( $\lambda$ ), ukazuje na taj odnos. Nagla i oštra ubrzanja uslovljavaju ubrizgavanje onoliko goriva koliko je potrebno da bi se ostvario željeni rad motora ( $\lambda$  bliže 1). U slučajevima kada se zahteva kočenje motorom motor će koristiti manju količinu goriva od uobičajene za broj obrtaja ( $\lambda$  znatno veće od 1).

$$\lambda = \frac{21,0}{21,0 - O_2} \quad (5)$$

Temperaturni gubici su izraženi jednačinom:

$$Losses = (T_{gas} - T_{air}) \cdot \left(\frac{A_1}{CO_2} + B\right) \quad (6)$$

$$A_1 = \frac{V_{dry\ min} \cdot C_{pm} \cdot CO_{2max}}{H_U \cdot CO_2} \quad (7)$$

$$B = \frac{V_{H2O} \cdot C_{pmH2O}}{H_U} \quad (8)$$

Gde je:

$V_{dry\ min}$  = količina suvog gasa

$C_{pm}$  = termalni kapacitet gasa

$H_U$  = neto kalorifikacija gasa

$V_{H_2O}$  = Količina vodene pare

$C_{pmH_2O}$  = termalni kapacitet vodene pare

Efikasnost je izračunata po formuli:

$$Efficiency = 100\% - Losses \quad (9)$$

#### **5.1.4 Baza podataka**

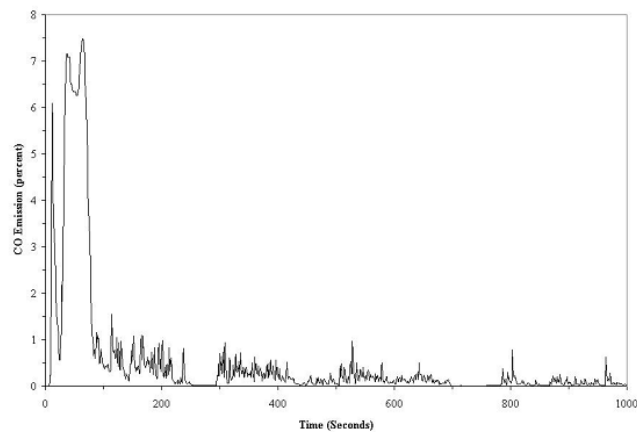
U okviru istraživanja analizirana je i mogućnost i pogodnost načina skladištenja podataka tako da se omogući lako manipulisanje podacima i njihova dalja obrada. Kod istraživanja u kojima se prikuplja veliki broj podataka postoji verovatnoća pojave različitih tipova grešaka tako da određeni broj podataka postaje neupotrebljiv. Greške nastaju usled otkaza nekog od elemenat merne instalacije, usled greške u proceduri merenja, usled uslova u saobraćajnom toku koji nisu iz domena istraživanja i dr. Pored očekivanih grešaka javljaju se i nepredviđene greške koje su definisane u procesu obrade podataka.

Ukupna baza podataka objedinjuje petnaestodnevna snimanja karakteristika rada vozila i emisija. Prikupljeno je oko 55.000 sekundi sa podacima za test vozilo. Podaci su složeni u tabele koje sadrže sve prethodno navedene podatke. Nakon logičke kontrole podataka u konačnoj bazi podataka ostalo je oko 49000 podataka, svaki prikupljen svake sekunde tokom vožnje u realnim uslovima u saobraćajnom toku. Vrednosti ubrzanja vozila su u rasponu od -16 do 16 m/s<sup>2</sup>, a brzina varira od 0 do 90 km/h.

Značajan problem bio propust u proceduri pripreme merenja kada nije izjednačen pritisak pa je na taj način izgubljen čitav dan merenja (oko 3500 podataka). U ostalim slučajevima, kada je procedura sprovedena, merna instalacija je pokazala pouzdan rad što se vidi po ukupno odstranjenim podacima od oko 5%.

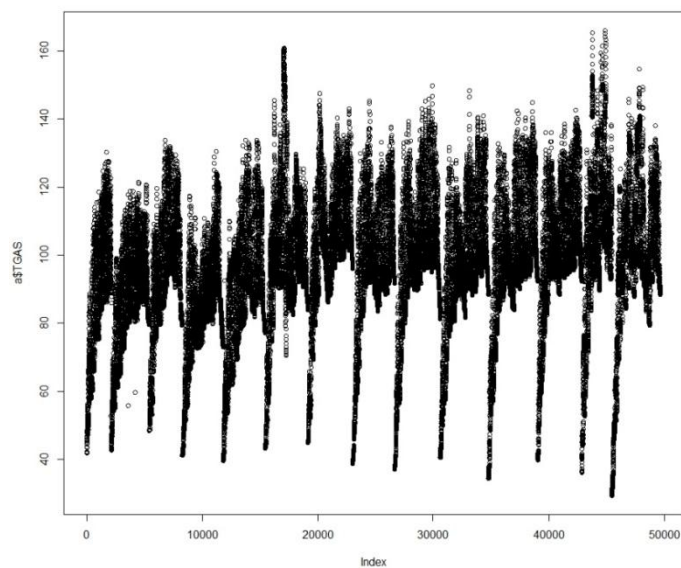
Odstupanja u podacima o emisijama nastaju usled grešaka mernih instrumenata. Vizuelnim pregledom delova vremenske serije podataka o emisijama i načinu kretanja (promene brzine) definisana su mesta nelogičnosti. Napravljene su provere na kritičnim tačkama o prisustvu grešaka ovog tipa u bazi podataka.

U prethodnim istraživanjima je rad u uslovima hladnog starta definisan kao osnovni uzročnik povećanih emisija (Frey et al. 2002). Prikazan je rezultat snimanja emisije CO u odnosu na protok vremena (Slika 5-4). Tokom prvih 300 sekundi putovanja CO emisije je relativno visoka. To je zbog rada u režimu hladnog starta. Posle prvih 300 sekundi emisija se stabilizuje. Minimalne vrednosti emisija u vremenskim intervalima nakon hladnog starta su dosledne i ne ukazuje na odstupanja.



Slika 5-4. Primer snimljenih trenutnih emisija (Frey et al. 2002)

U radu je napravljena provera podataka za potencijalne uslove hladnog starta. Prikazani su svi snimljeni podaci i njihova temperatura izlaznog gasa (Slika 5-5).



Slika 5-5. Temperatura izlaznog gasa za celu bazu podataka

Na slici se jasno izdvajaju podaci čija je temperatura izlaznog gasa manja (ispod 80°C). Izdvajanjem tih podataka iz ukupne sume podataka u stanju mirovanja i poređenjem srednje vrednosti nisu dobijene značajne razlike pa je zaključeno da su svi snimljeni podaci zabeleženi van zone rada u uslovima hladnog starta.

Nakon formiranja kompletnog skupa validnih podataka izveden je proračun varijabli koje su neophodne u procesu režimskog modeliranja:

- Trenutno ubrzanje,
- Potrebna snaga motora i
- Količina emitovanog štetnog gasa (za sve zagađivače u mg/s ili g/s).

Emisije vozila su proizvod procesa sagorevanja u motoru koji je u zavisnosti od potrebne snage motora. Prethodne studije su pokazale da je moguće uspostaviti odnos potrebne snage i emisije zagađujućih materija (Leung & Williams 2000; Frey, Unal, Chen, et al. 2003; Song et al. 2012). Izračunavanje potrebne snage motora, je izvedeno kao proizvod brzine i ubrzanja, a može biti iskorišćeno i efektivno ubrzanje ili specifična snage vozila (Prilog 6).

Pored toga definisane su i kategorije saobraćajnica na kojima je zabeležena emisija upotrebom Google Earth-a i povezivanjem snimljenih podataka sa lokacijama snimanja. Moguće je definisati i pređeni put u svakoj sekundi ali to u ovom trenutku nije bilo potrebno.

Proračun trenutnog ubrzanja izveden je na osnovu trenutne brzine vozila. Ubrzanje je izraženo u km/h/sec i izračunato je kao razlika brzine u n-toj i n-1 sekundi snimanja. Odabrano je da ostane u navedenoj jedinici zbog jednostavnosti celokupne obrade podataka i o tome će biti više reči u narednom poglavlju.

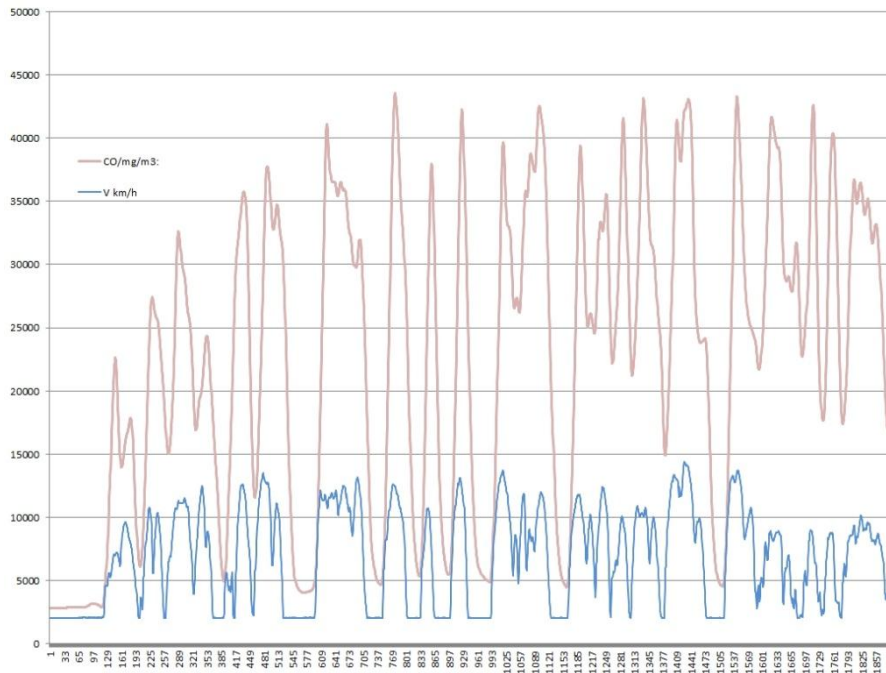
Kombinovana baza podataka sadrži navedene dodatne podatke i predstavljena je na slici i tabeli (Tabela 5-3).

Tabela 5-3. Sadržaj baze podataka o režimskim emisijama vozila

Kategorija podataka	<i>Parametri</i>
Karakteristike vozila	Veličina motora; Pređena kilometraža; ECE kategorija
Ambijentalni uslovi i karakteristike emitovanog gasa	Ambijentalna temperatura (°C); Temperatura gasa (°C); Brzina gasa (m/s); Temperaturni gubici; Efikasnost sagorevanja
Karakteristike saobraćajnice (pozicija)	Latituda; Longituda; Altituda; Rang saobraćajnice;
Aktivnosti vozila	Trenutna brzina (km/h); Trenutno ubrzanje (km/h/s); Potrebna snaga (km <sup>2</sup> /h <sup>2</sup> /s); Datum; Vreme; Lambda;
Emisije vozila	HC, CO, NO, CO <sub>2</sub> i O <sub>2</sub> emisija (u ppm, mg/m <sup>3</sup> , g/sek, %)

### 5.1.5 Kalibracija i validacija baze prikupljenih podataka

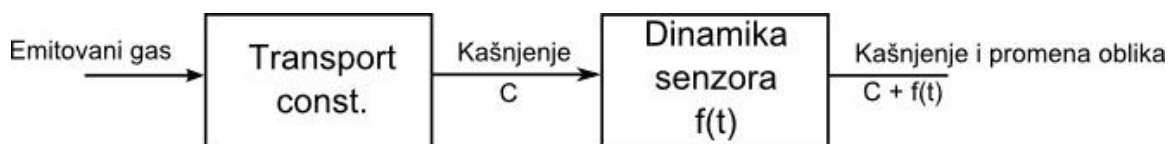
U obradi podataka izvršeno je usaglašavanje podataka po vremenskoj osi tako da se za svaku kombinaciju brzina/potrebna snaga dobila stvarna vrednost emisije. Na slici su prikazani podaci snimljeni u toku jedne vožnje (Slika 5-6). Prikazane su linije promene brzine (plava linija) i promena emisije CO u ppm (crvena).



Slika 5-6. Promena snimljene emisije u odnosu na promenu brzine

Senzor nije u mogućnosti da dovoljno brzo reaguje na nagle promene emisija usled ubrzanja i usporenja pri vožnji. Određene maksimalne vrednosti emisija su usled brze promene brzine i spore reakcije senzora trajno izgubljeni. Pored toga vidi se i pomeraj (kašnjenje) signala emisije u odnosu na signal brzine.

Definisan je pristup za obradu signala emisije u kome se ceo sistem posmatra kao da je sastavljen iz jednog konstantnog dela zakašnjenja i jednog dinamičkog dela (odziv mernog uređaja).



Slika 5-7. Blok dijagram vremena kašnjenja u sistemu prenosa gasa

Konstantni deo kašnjenja je utvrđen vizuelnim pregledom podataka i on se zbog celokupne dinamike kašnjenja signala razlikovao za različite vožnje.

Utvrdjivanje dinamike reakcije senzora je definisano upotrebom teorije kontrole sistema. Više o teoriji kontrole sistema se može pročitati u Prilogu disertacije (Prilog 3). Osnovna ideja je da se ceo sistem za merenje emisija posmatra kao

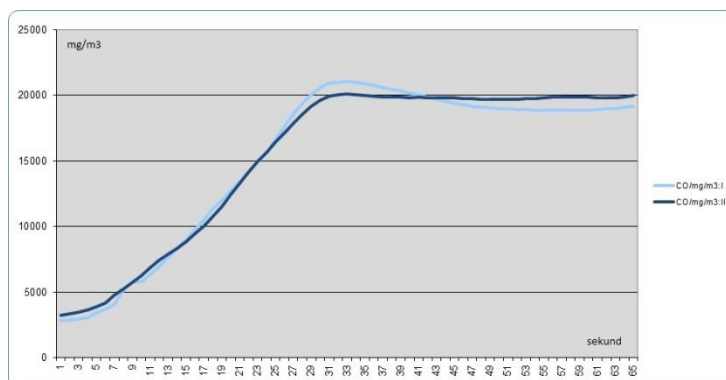
jedan element iako se on sastoji od sonde, toplog voda za uzorkovanje gasa i senzora za registrovanje emisija.



Slika 5-8. Blok dijagram uređaja za merenje emisije

Reakcija mernog uređaja definisana je na osnovu snimanja ponašanja uređaja u stabilnim uslovima rada sa poznatom emisijom. Ovakvo uopštavanje se smatra dovoljno preciznim da opiše ponašanje sistema. Uređaj je priključen na vozilo u mirovanju i snimam je njegov odziv na ulazni signal. Vrednost ulaznog signala je očitana sa uređaja nakon vremena koje je bilo potrebno za dobijanje stabilne izlazne (izmerene vrednosti). Ulazni signal je posmatran kao stepenasta funkcija (u kojoj vrednost emisije trenutno skače na izlaznu vrednost).

Rezultati snimanja promene vrednosti CO su predstavljeni na sledećoj slici (Slika 5-9). Prikazane su dve reakcije instrumenta u različitim uslovima koje se stabilizuju oko slične vrednosti izlaza. Vidi se da kod prvog uzorka (svetla linija) dolazi i do prekoračenja stabilne vrednosti što je rezultat prethodno navedene aproksimacije ulazne emisije. Odabrana je kriva dobijena iz drugog uzorka (tamna linija) koja prikazuje stabilniji odziv.



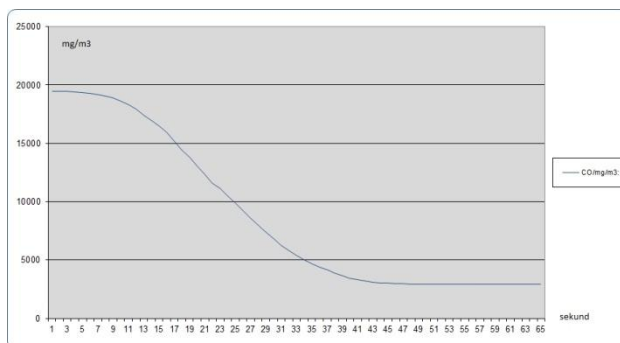
Slika 5-9. Statičko snimanje odziva uređaja – porast emisije CO

Na osnovu statičkog snimanja odziva uređaja formiran je skup podataka koji služi za definisanje prenosne funkcije uređaja. Prenosna funkcija opisuje dinamiku



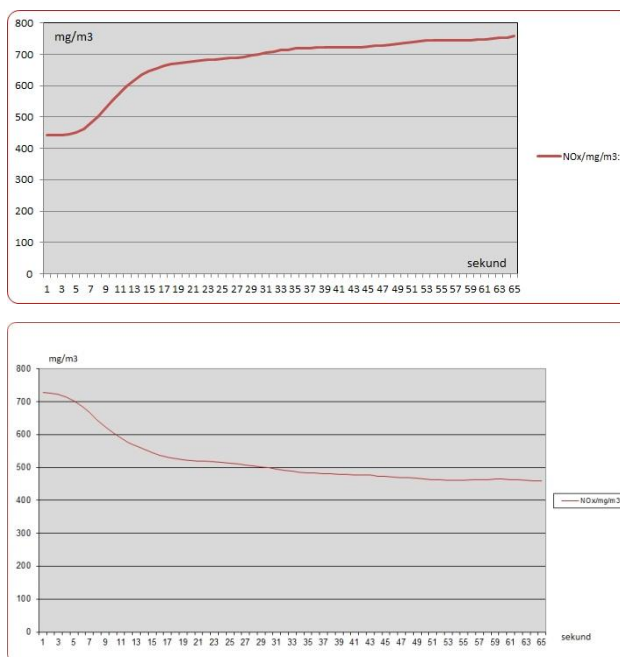
promene registrovane emisije na samom uređaju tokom vremena kada je na ulaz dovedena stepenasta funkcija emisije.

Snimljen je i pad emisije po istom principu kao i porast. Kriva koja je služila za definisanje funkcije prenosa je prikazana na grafiku (Slika 5-10).

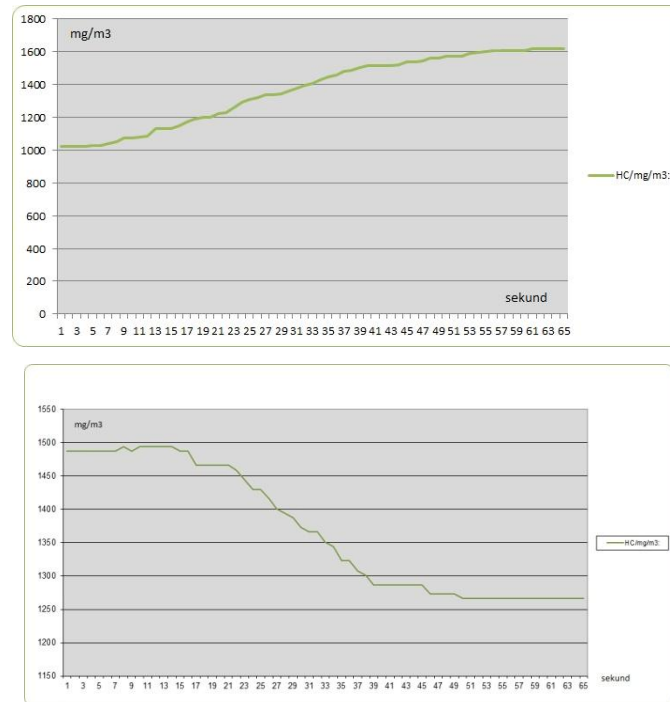


Slika 5-10. Statičko snimanje odziva uređaja – pad emisije CO

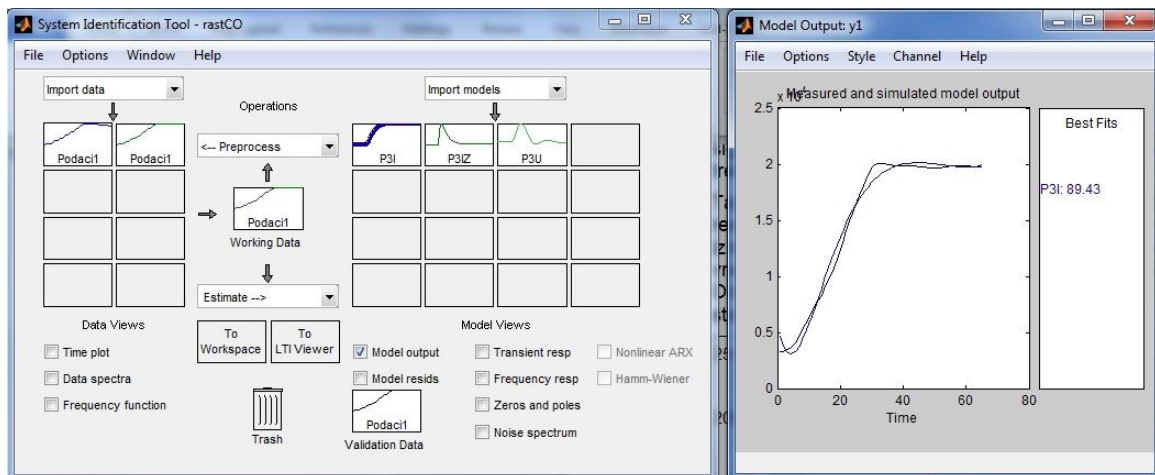
Na sledećim slikama su prikazani rezultati statičkih snimanja porasta i pada emisija za  $\text{NO}_x$  i  $\text{CH}_4$  (Slika 5-11 i Slika 5-12).



Slika 5-11. Statičko snimanje odziva uređaja – porast i pad emisije  $\text{NO}_x$

Slika 5-12. Statičko snimanje odziva uređaja – porast i pad emisije CH<sub>4</sub>

Za identifikaciju funkcija prikazanih odziva sistema na stepenastu funkciju korišćen je MATLAB (Slika 5-13). Prepoznate su i definisane funkcije prenosa za CO, HC i NO<sub>x</sub> u segmentu kada funkcija raste do konstantne vrednosti i kada funkcija pada do vrednosti emisije u praznom hodu.



Slika 5-13. Prikaz MATLAB aplikacije za identifikaciju odziva sistema

Rezultat identifikacije sistema su elementi prenosne funkcije (nule i polovi). Na osnovu toga je moguće definisati i inverznu prenosnu funkciju koja govori o

inverznom procesu. Inverzna funkcija prenosa je iskorišćena da se poništi efekat koji merni uređaj ima na registrovanje signala emisija.

Odabrane su funkcije prenosa trećeg reda (funkcija opadajućeg prigušenja sa dva imaginarna i jednim realnim polom). Pozicije imaginarnih polova su definisane na osnovu odnos prigušenja ( $\zeta$  - zeta) i prirodna frekvencija neprigušenih oscilacija ( $\omega_n$ ). Dodatna objašnjenja se mogu naći u prilogu (Prilog 3). Jednačina funkcije prenosa u „s“ domenu ima oblik jednačine (10).

$$G(s) = \frac{K_p}{(1 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + (\omega_n \cdot s)^2)(1 + T_{p3} \cdot s)} \quad (10)$$

gde je:

$K_p$  – proporcionalni priraštaj sistema (proportional gain)

$\zeta$  (Zeta) – odnos prigušenja (damping ratio)

$\omega_n$  – prirodna frekvencija neprigušenih oscilacija (natural undamped frequency)

$T_{p3}$  – realni pol

Dobijeni su sledeći koeficijenti koji omogućavaju formiranje funkcije prenosa za svaki zagađivač pri porastu i padu emisije (Tabela 5-4).

Tabela 5-4. Koeficijenti funkcija prenosa

	<i>CO rast</i>	<i>CO pad</i>	<i>NOx rast</i>	<i>NOx pad</i>	<i>CH4 rast</i>	<i>CH4 pad</i>
$K_p$	1.0323	0.76635	0.99315	0.98507	1.0886	0.92928
$\omega_n$	6.0646	7.4608	3.4152	3.3473	11.91	7.4887
$\zeta$	0.3164	0.43233	0.36595	0.40626	0.44012	0.20785
$T_{p3}$	12.817	16.322	15.978	15.657	45.957	38.758

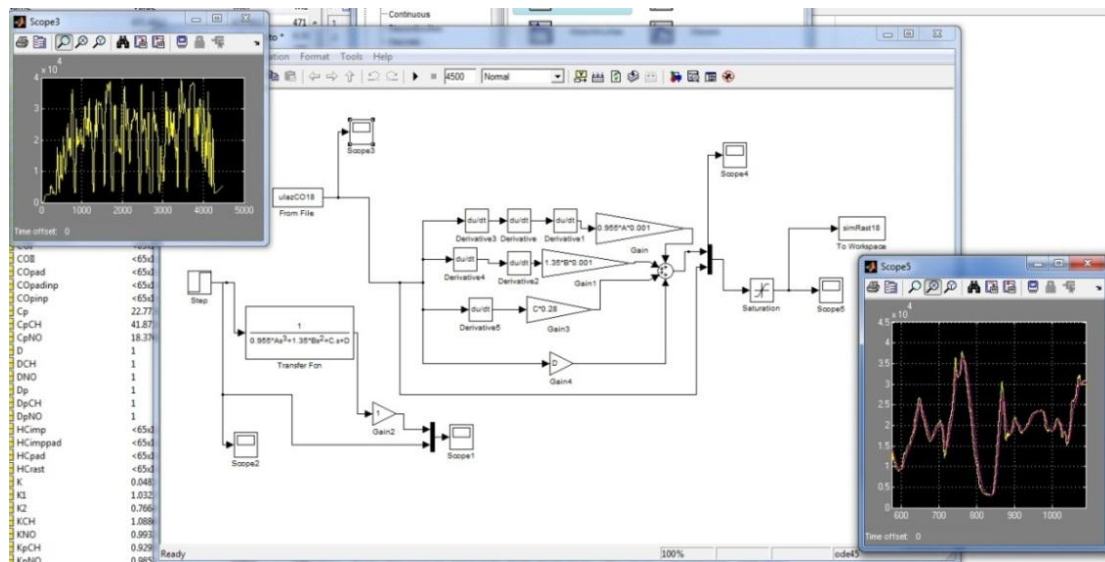
Zasnovano na teoriji kontrole sistema, stepenasta funkcija na ulazu i snimljeni izlazni signal, su upotrebljeni za definisanje prenosne funkcije, odnosno zakonitost po kojoj dolazi do prelaza iz stepenaste u realnu izlaznu funkciju, koja predstavlja

ono što merni uređaj registruje. Odziv uređaja nije trenutna pa se koristi definisana prenosna funkcija u suprotnom smeru: realni, snimljeni signal koji kasni se rekonstruiše da bi se dobio signal na izlazu iz izduvne cevi. Iskorišćena je inverzna prenosna funkcija da bi se signal koji je uređaj registrovao, „ubrzao“. Na taj način se eliminiše uticaj mernog uređaja na izobličenje emisije.

Rekonstrukcija inverzne funkcije i transformacija velike količine podataka izvedena je u MATLAB-u – segment Simulink. Formiran je simulacioni blok dijagram koji oponaša efekat inverzne prenosne funkcije.

Simulacioni blokovi su formirani tako što se koeficijenti funkcije prenosa u imeniocu funkcije izmnože da bi se dobili koeficijenti koji stoje uz stepene promenljive  $s$ . Po teoriji kontrole sistema, „ $s$ “ funkcija je izvod funkcije, a inverzna „ $s$ “ funkcija je integral (suprotna funkcija od izvoda).

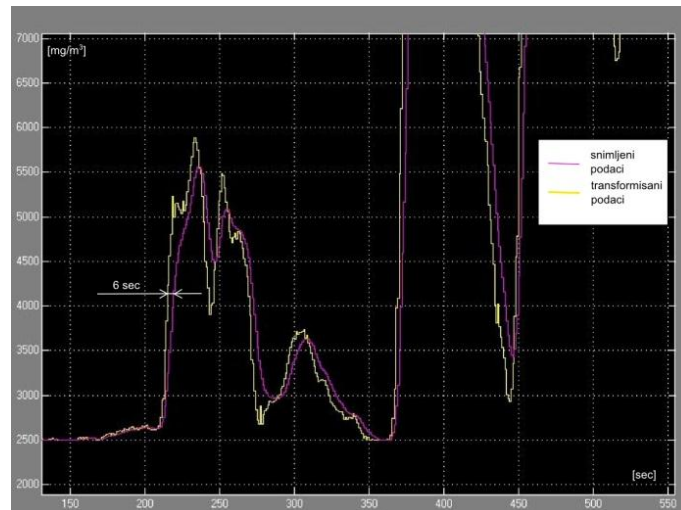
Tako je na blok dijagramu  $s^3$ , predstavljeno kao trostruki integral, pomnožen pripadajućim koeficijentom. Koeficijenti su dodatno korigovani dodavanjem konstanti koje su definisane vizuelnim pregledom rezultata da bi se izbegle nelogičnosti rezultata (npr. emisije manje od 0). Na narednoj slici je prikazan konstruisani blok dijagram (Slika 5-14).



Slika 5-14. Blok dijagram kola za simuliranje inverzne prenosne funkcije

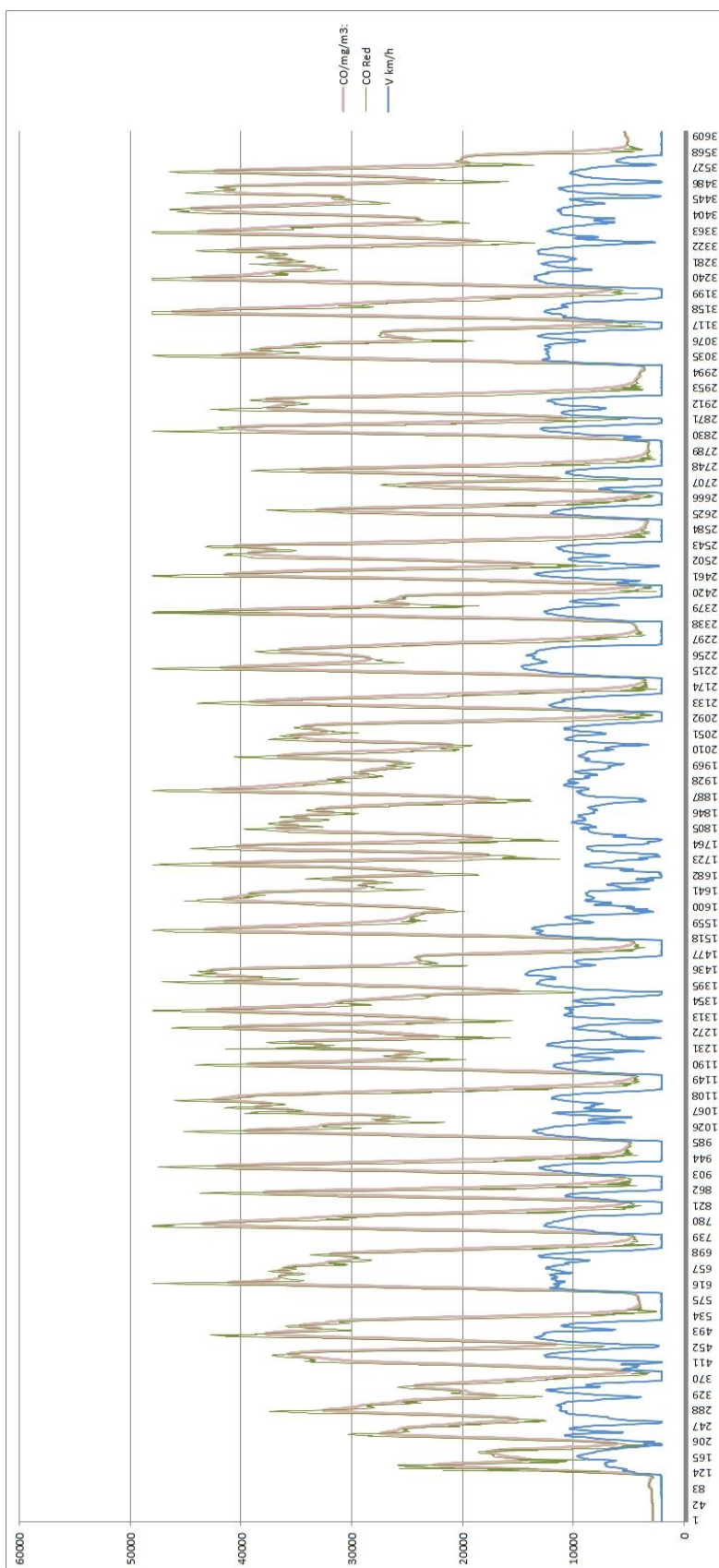
U modulu „Simulink“ transformisan je ulazni signal koji predstavljaju emisije snimljene prilikom istraživanja (žuta linija) uz pomoć inverzne funkcije prenosa.

Rezultat je korigovana funkcija u kojoj je obezbeđena brža reakcija signala na promenu brzine (Slika 5-15). Prekoračenje maksimalne registrovane emisije je takođe definisano prenosnom funkcijom (posledično i njenom inverznom funkcijom).



Slika 5-15. Modifikacija izlaznog signala (Simulink)

Reakcija uređaja je ubrzana u slučajevima kada emisije rastu i opadaju. Na predstavljenoj lokaciji signal je ubrzan za 6 sekundi. Rezultat je poboljšanje u reakciji koje se vidi na kompletnom grafiku emisija (Slika 5-16). Ipak, izgubljene informacije nije moguće povratiti već se samo približiti realnosti ostvarivanjem bržih reakcija prilikom ubrzanja i usporenja kao i kontrolisano pojačavanje signala usled efekta poravnavanja i gubljenja maksimuma.



Slika 5-16. Promene vrednosti emisija nakon korekcije

Validacija dobijenih podataka je svedena na vizuelnu proveru i proveru ukupne emisije. Emisije CO imaju tendenciju da se povećavaju u isto vreme kao i broj obrtaja motora. Odnos između vremenske serije podataka o emisijama CO i broj obrtaja motora ukazuju na prisustvo greške usled sinhronizacije (Frey et al. 2002). Zato se sprovode provere u karakterističnim tačkama na podacima za sinhronizaciju grešaka. Isti princip iskorišćen je i u disertaciji. Nakon redukcije dinamike registrovanja signala emisije vremenski su usaglašene maksimalne/minimalne odnosno karakteristične vrednosti brzina sa izmerenim emisijama.

Provera kvantiteta korekcije izvršena je na primeru jedne vožnje (skupa od 3624 podatka). Usled korekcije izmerenih vrednosti emisija došlo je do promene u ukupnoj emisiji CO sa 83299563 mg/m<sup>3</sup> na 81743437 mg/m<sup>3</sup>, što iznosi 1556126 mg/m<sup>3</sup> ili smanjenje ukupne emisije od 1.87%. Moguće je i smanjenje emisije jer senzori beleže zakašnjenja kako pri ubrzanju tako i pri usporenju, odnosno pri povećavanju ili smanjivanju registrovane emisije. Nije izvršena značajna modifikacija rezultata, s obzirom na veličinu promene ukupne emisije.

Maksimalna registrovana vrednost emisije CO je korigovana za 3.89%, a minimalna za 10.55%. Velika promena minimalnih vrednosti je posledica malih vrednosti emisija tako da promena u apsolutnoj vrednosti iznosi 295 mg/m<sup>3</sup>. Koeficijent korelacije između snimljenih i modifikovanih podataka iznosi 93.8.

Dobijene su promene u ukupnoj emisiji NO<sub>x</sub> sa 5152516 mg/m<sup>3</sup> na 5151114 mg/m<sup>3</sup>, što iznosi 1402 mg/m<sup>3</sup> ili smanjenje ukupne emisije od 0.03%. Maksimalna registrovana vrednost emisije NO<sub>x</sub> je korigovana za 2.43%, a minimalna za 3.76%. Koeficijent korelacije između snimljenih i modifikovanih podataka iznosi 91.1.

Zabeležena je i ukupna promena emisije CH<sub>4</sub> sa 6222602 mg/m<sup>3</sup> na 6221652 mg/m<sup>3</sup>, što iznosi 949 mg/m<sup>3</sup> ili smanjenje ukupne emisije od 0.02%. Maksimalna registrovana vrednost emisije CH<sub>4</sub> je korigovana za 11.25%, a minimalna za 55.48%. Promena minimalnih vrednosti je posledica malih vrednosti emisija tako da promena u apsolutnoj vrednosti iznosi 623 mg/m<sup>3</sup>. Koeficijent korelacije između snimljenih i modifikovanih podataka iznosi 87.7.

Opšti zaključak je da nije izvršena značajna modifikacija rezultata, s obzirom na veličinu promene emisije.

U toku prikupljanje podataka postoji vreme koje se gubi za prenos prikupljenog gasa koje se meri i podaci se poravnavaju na osnovu izmerenog vremena kašnjenja. Male greške u sinhronizaciji nemaju bitnog uticaja na procenu ukupne emisija putovanja (Frey et al. 2001a). Zato se pretpostavlja da nakon ovako izvršene sinhronizacije u tim podacima ne postoji značajna greška.

Validacija podataka nije mogla da se obavi bez dodatnih merenja pomoću neke druge metode kao što su testovi na dinamometru. Obavljena je sa vizuelna i logička kontrola podataka u odnosu na promene koje se dešavaju u emisijama sa promenom brzine kretanja vozila.

Osnovna validacija se odnosila na kontrolu maksimalnih dobijenih vrednosti prilikom merenja i poređenjem sa vrednostima koje su poznate u literaturi. U istraživanju koje je sprovedeno na vozilu proizvedenom 1999. godine (Frey et al. 2001b) maksimalne emisije u jednoj vožnji su oko 0.2 g/s. Dok su u bazi podataka ove disertacije vrednosti za vozilo proizvedeno 1992. godine maksimalno oko 1.2 g/s. Razlika u godini proizvodnje i starost vozila u trenutku istraživanja su utvrđeni kao razlog šestostruke razlika maksimalnih emisija.

Nakon korekcije emisija izvršeno je pretvaranje u pogodne jedinice (g/s).



## 5.2 Rezultati istraživanja

Razvijena metoda za prikupljanje podatka omogućava formiranje baze podataka o emisijama u svakoj sekundi. Ovako formirana baza podataka je reprezentativna za razvoj emisionih modela na makro i mezo nivou s obzirom da mala vremenska odstupanja u sinhronizaciji podataka neće značajno uticati na ukupnu srednju vrednost emisije određene kombinacije brzine i potrebne snage. Ostaje otvoreno pitanje reprezentativnosti baze podataka za modeliranje na mikro nivou. Sinhronizacija podataka bi morala da bude potvrđena drugim metodom istraživanja. Iz tog razloga je razvoj mikro modela predviđen u budućim istraživanjima, a u disertaciji je samo dat predlog uticajnog parametra koji bi mogao da služi kao korekcionni faktor emisije.

U okviru ovog poglavlja fokus će biti na vizuelizaciji podataka kao priprema za proces definisanja modela.

Baze podataka o trenutnim emisijama vozila na izduvnoj cevi sadrže oko 49000 pojedinačnih podataka (nakon izbacivanja podataka na kojima su utvrđene greške). Podaci su zabeleženi u svakoj sekundi tokom vožnje u realnim uslovima u saobraćajnom toku. Što su vrednosti brzina i ubrzanja veća njihova frekvencija u bazi podataka je manja (Prilog 7). Skup podataka koji su ušli u obradu i formiranje modela je redukovan na uslove umerene vožnje. Eliminirani su podaci u uslovima jakih ubrzanja i usporenja kao i brzine veće od 80 km/h jer je njihova frekvencija mala pa bi mogli da prouzrokuju veću nepreciznost modela.

Organizacija podataka.

Podaci su integrisani tako da je dobijen set koji sadrži:

- Podatke o poziciji (latitudu, longitudu i altitudu)
- Podatke o karakteristikama saobraćajnog toka: trenutnu brzinu i ubrzanje
- Podatke o emisijama: CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> i O<sub>2</sub>.
- Podatke o brzini gasa i temperaturama: brzina i količina izduvnog gasa, temperatura izduvnog gasa i ambijentalnog vazduha
- Podatke o sagorevanju: proračunate veličine emisije CO<sub>2</sub>, izlaznog kiseonika (Lambda), temperaturnih gubitaka i efikasnosti.

Podatke o poziciji karakterišu odstupanja usled osetljivosti GPS uređaja. Naročito je primetno u mirovanju kada maksimalna odstupanja mogu biti i do 15m, dok su pri kretanju odstupanja manja od 3m i to u 95% slučajeva.

Podaci o kretanju dobijeni sa GPS uređaja imaju svoj nivo preciznosti određen mogućnostima uređaja. Tačnost brzine kretanja je  $\pm 0.1$  čvor odnosno  $\pm 0.2$  km/h u stanju mirovanja. Za potrebe režimskog modeliranja formirane su klasa u koje će biti grupisane vrednosti brzina i ubrzanja kao i izvedene potrebne snage. Nije moguće manipulirati sa tako velikim brojem preciznih podataka pa se klasiranjem taj segment čini jednostavnijim. Vrednosti brzina su zaokružene na celobrojnu vrednost što podrazumeva da je brzina u jednoj klasi u rasponu  $\pm 0.5$  km/h oko celobrojne vrednosti.

U radu je razmatrana upotreba ubrzanja i potrebne snage kao drugog uzročnog parametra na emisiju. Ubrzanja su svrstana u veći broj klasa da bi se definisao i režimu u kome se vozilo nalazi u konkretnom trenutku. Ubrzanja i usporenja su takođe zaokružena na celobrojne vrednosti sem u opsegu od -1 do 1  $m/s^2$ . Režim ubrzanja je definisan kretanjima koja imaju ubrzanje veće od 0.5  $m/s^2$ , a usporenja manja od 0.5  $m/s^2$ . Usporenja između -0.5 i 0 su posmatrana kao kretanje po inerciji, van stepena prenosa. Ubrzanja između 0.5 i 0 su svrstana u režim ravnomerne vožnje. Vrednost emisije pri lep gasu je rezultat uprosečavanja vrednosti pri nultoj brzini i ubrzanju između 0.5 i -0.5.

Zbog velikog raspona vrednosti potrebne snage su zaokruživane na  $\pm 10$   $km^2/h^2/s$ . Pored toga vrednosti između -10 i 0 su svrstane u posebnu klasu (klasa -5) kao i vrednosti između 0 i 10 (klasa 5). Ove klase su analogne klasama koje su opisane u prethodnom pasusu, a tiču se ravnomerne vožnje i kretanju po inerciji.

Na taj način su definisani segmenti režimskog modela koji se odnose na osnovne režime vožnje (Slika 5-17).

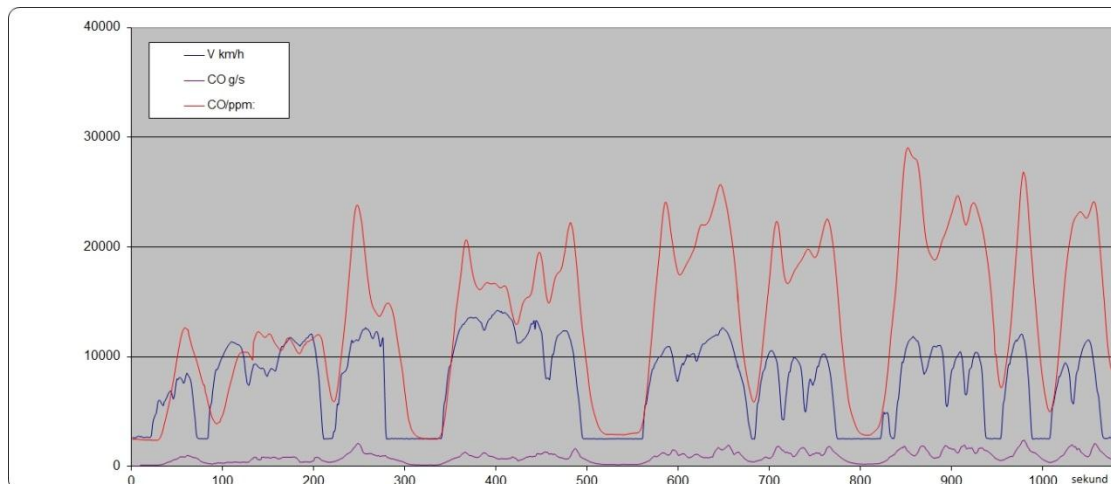
		potrebna snaga pri usporenju		potrebna snaga pri ubrzanju		
		(-5 do -240)		+5	(+5 do +240)	
brzine (0 do 87 km/h)	0			PRAZAN HOD		
	brzine veće od 0	USPORENJE		USLOVI RAVNOMERNOG KRETANJA	UBRZANJE	

Slika 5-17. Raspored podataka po režimima

Broj prikupljenih podataka po režimima prikazan je u prilogu (Prilog 7).

Podaci o trenutnim emisijama pojedinačnih zagađivača su svaki za sebe usaglašavani sa vremenskom osom. Poklapanje vremenskih osa je urađeno posebno za CO, NO<sub>x</sub> i CH<sub>4</sub>. Vremenski pomerač je posledica različite reakcije senzora na ulazni signal i vremena transporta gasa kroz instalacije mernog instrumenta. Početak emisije je usaglašavan sa početkom kretanja (promenom brzine) koje beleži GPS uređaj, kada se očekuje promena emisije. Na podacima o CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> i veličinama koje se računski dobijaju iz njih (gubici, Lambda i temperature) zbirno je izvršeno usaglašavanje na osnovu promene emisije kiseonika (O<sub>2</sub>). Emisija O<sub>2</sub> ima tendenciju opadanja u emitovanom gasu sa početkom kretanja.

U analizi vremenske usaglašenosti podataka testirane su i reakcije mernog instrumenta na startu i prekidu rada motora. Po prekidu rada motora svi senzori jednovremeno reaguju. Regstruje se veliko smanjenje svih zagađivača (CO, NO<sub>x</sub> i HC) dok brzina gasa pada na 0. Pri paljenju motora, nakon 5 sekundi brzina gasa se povećava dok je za reakciju senzora gasova potrebno još dodatnih 6 sekundi za NO<sub>x</sub> i HC, a dodatna sekunda za CO. Rezultat govori o vrednostima pomeranja podataka po vremenskoj osi pri usaglašavanju po vremenskoj osi. Vrednosti su upoređivane vizuelno i kroz tabele snimljenih podataka u statičkom režimu (Slika 5-18). Uočene razlike u reakcijama su se našle u okviru tako registrovanih razlika.



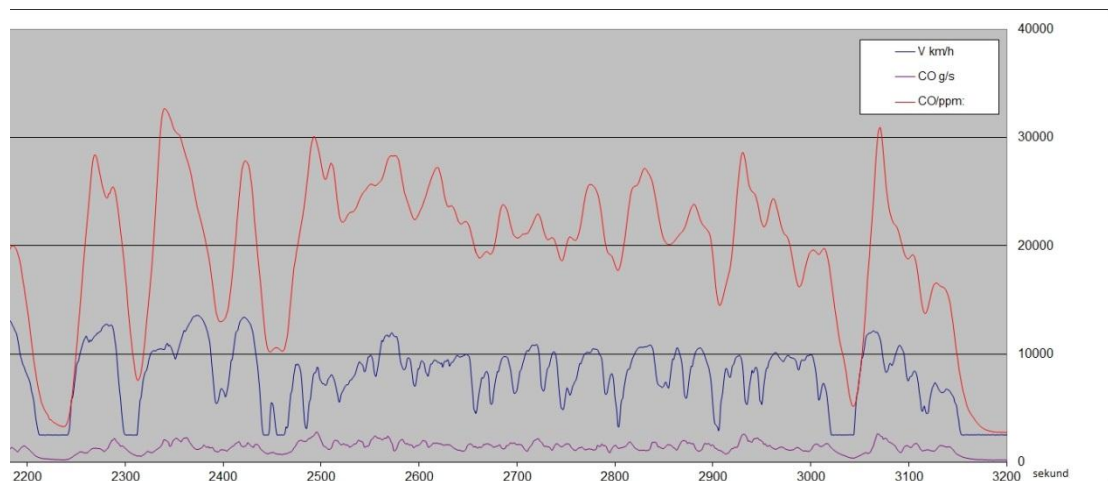
Slika 5-18. Snimljeni podaci – izvorna forma

Na slici se vidi neusaglašenost podataka o brzinama kretanja (plava linija - V km/h) u odnosu na snimljene emisije u ppm (crvena linija - COppm).

Maksimalna emisija se javlja pri velikim ubrzanjima. Većina vrhova u emisiji CO se podudara sa ubrzanjima vozila. Stopa emisije tokom praznog hoda ili spore vožnje relativno niska u odnosu na emisije tokom ubrzanja. Velike emisije ne moraju biti povezane sa zagušenim stanjima u saobraćaju, kao što se često pretpostavlja. Umesto toga, visoke emisije se mogu pojaviti na određenim lokacijama zbog načina vožnje (naglih i čestih ubrzanja i usporenja). Tako se naglašava ogroman značaj merenja emisija u vožnji (Frey et al. 2002).

Prethodna istraživanja govore da su emisije HC relativno neosetljive. To znači da prosečne emisije HC mogu biti relativno konstantne, u zavisnosti od brzine i ubrzanja u poređenju sa drugim zagađivačima (Frey et al. 2002).

Emisija zagađivača su veće u periodu vožnje u režimu stani/kreni sa brzinama u rasponu od nule do 40km/h. To je karakteristično za saobraćajnu mrežu nižeg ranga u odnosu na saobraćajnice na kojima je uobičajena vožnja većom brzinom (npr. magistrale). Uporedno su na sledećim slikama prikazane emisije u toku iste vožnje na magistralnoj mreži i mreži nižeg ranga (Slika 5-19).



Slika 5-19. Razlike u karakteristikama emisije u odnosu na kategoriju saobraćajnice

Segment emisija pre 2500. sekunde (na x osi) je karakterističan za vožnju na magistralnoj mreži. Dobar pokazatelj predstavlja promena brzine (plava linija). Ređe promene brzine i veće maksimalne vrednosti su karakteristične za magistralnu mrežu. Nakon 2500. sekunde zabeležene su česte promene brzine i manja maksimalna vrednost što je karakteristika vožnje po mreži nižeg ranga.

Rezultati istraživanja su sačuvani u vidu tabela i grafički u fajlu koji se može otvoriti u Google Earth-u. Na taj način je omogućena vizuelizacija podataka i lako povezivanje sa lokacijama, odnosno pretraga baze po lokacijskom kriterijumu (Slika 5-20).



Slika 5-20. Grafički prikaz podataka u kml fajlu

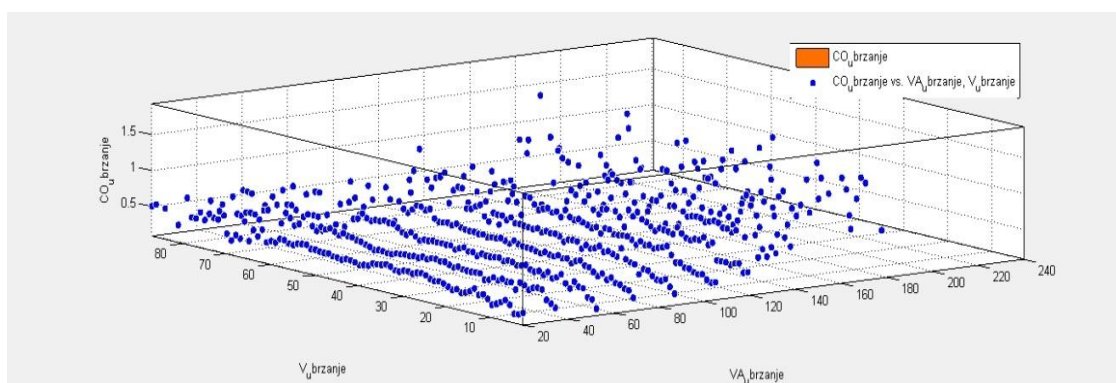
Rezultati istraživanja su sumirani i prikazani u matricama brzina/ubrzanje/emisija i brzina/potrebna snaga/emisija (Prilog 8). Utvrđeno je da je za stvaranje emisija uticajniji faktor potrebne snage u odnosu na ubrzanje. U nastavku su svi podaci i rezultati prikazivani na osnovu prethodno klasa definisanih.

### 5.2.1 Emisije u zavisnosti od brzine i potrebne snage

Sve emisije koje su zabeležene u okviru istraživanja i izdvojene za definisanje modela zavisnosti emisije od trenutne brzine i potrebne snage su svedene na prosečne vrednosti. Tabele prosečnih vrednosti su prikazane u prilogu (Prilog 8). Za sve kombinacije brzina i potrebnih snaga definisano je i standardno odstupanje što je prikazano u prilogu (Prilog 9). U narednom tekstu će biti prikazani predstavljeni podaci pripremljeni za modeliranje i to za osnovne zagađivače (CO, NO<sub>x</sub> i CH<sub>4</sub>).

#### *Srednje vrednosti emisija ugljen-monoksida (CO)*

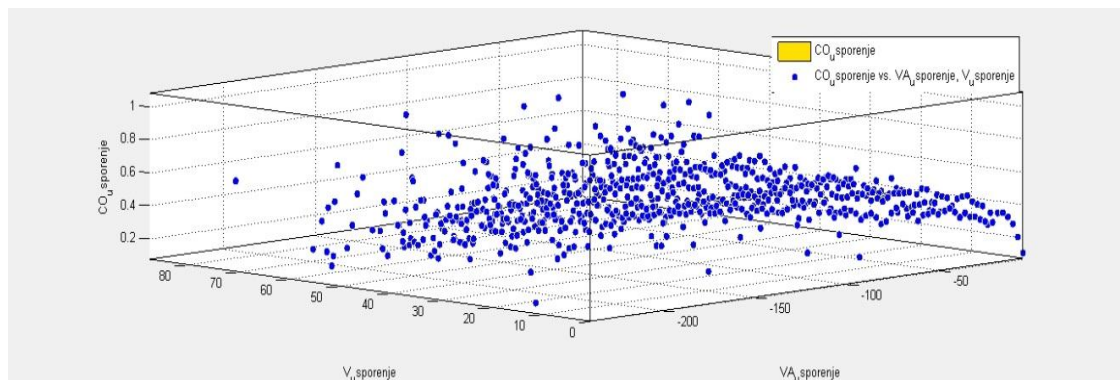
U 3D prostoru su prikazani podaci srednjih vrednosti emisije CO u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu ubrzanja (Slika 5-21) . Maksimalne emisije CO uzimaju vrednosti do 1.5 g/s i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje uzimaju vrednosti od 1 do 80 km/h i potrebna snaga, čije vrednosti su u opsegu od 20 do 240 km<sup>2</sup>/h<sup>2</sup>/s. Pozitivan predznak potrebne snage upućuje na režim ubrzanja.



Slika 5-21. Srednje emisije CO pri ubrzanju prikazane u 3D prostoru

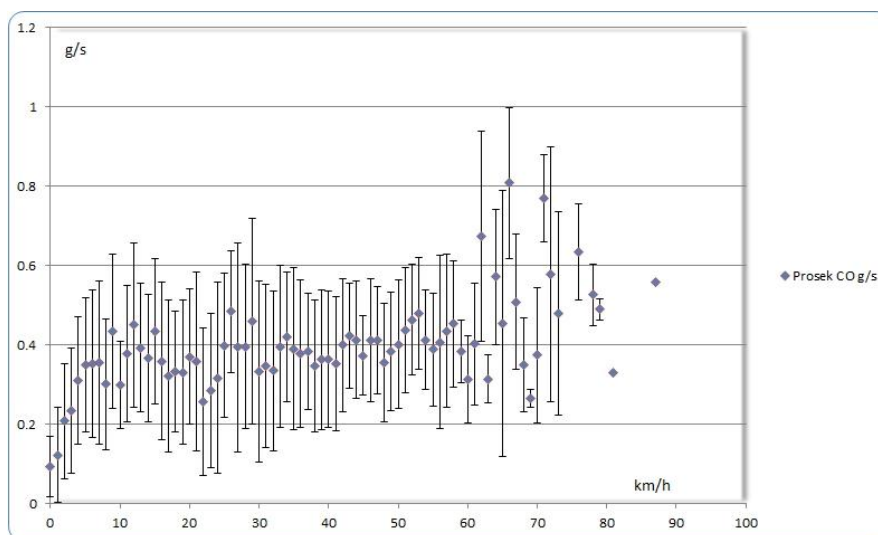
Na sledećoj slici (Slika 5-22) su u 3D prostoru prikazani podaci srednjih vrednosti emisije CO u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu usporenja. Maksimalne emisije CO uzimaju vrednosti do 1.0 g/s i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje uzimaju vrednosti od 1 do 80 km/h i potrebna snaga, čije

vrednosti su u opsegu od -20 do -240 km<sup>2</sup>/h<sup>2</sup>/s. Negativan predznak potrebne snage upućuje na režim usporenja.



Slika 5-22. Srednje emisije CO pri usporenju prikazane u 3D prostoru

Za vrednosti prosečnih emisija CO u režimu ravnomernog kretanja (bez promene ubrzanja) napravljen 2D grafik (Slika 5-23). Na grafiku su istaknute srednje vrednosti emisija ali su prikazana i standardna odstupanja izmerenih vrednosti od srednje vrednosti kojima se prikazuje stepen varijabilnosti podataka. Izmerene vrednosti ukazuju na rastući trend emisija CO sa povećanjem brzine kretanja u uslovima ravnomerne kretanja.



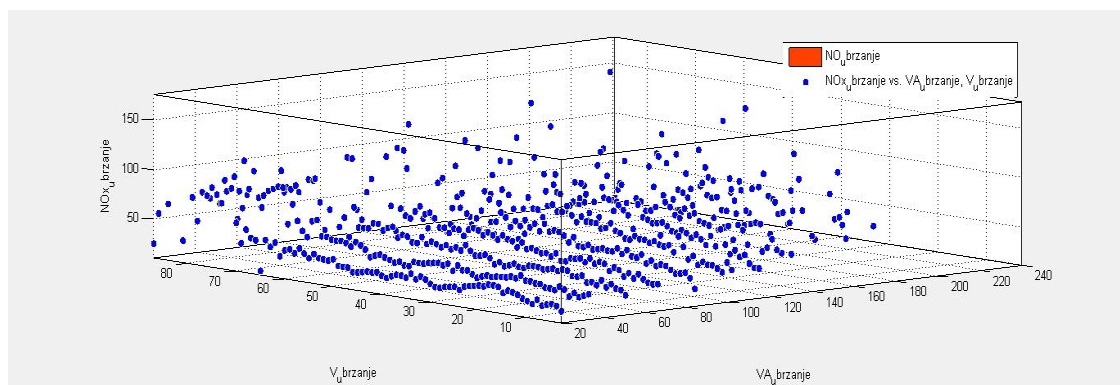
Slika 5-23. Srednje emisije i standardna odstupanja CO pri ravnomernoj vožnji

Emisija CO vozila u mirovanju dobijena je kao prosečna vrednost svih emisija tog režima. Emisije CO u režimu mirovanja iznosi 0.093 g/s, dok je standardno odstupanje 0.076 g/s. Standardno odstupanje emisije u režimu mirovanja je posledica različitih uslova rada motora u tom režimu; emisije su zabeležene kako

neposredno po zaustavljanju vozila tako i u periodima dužeg mirovanja kada se emisije razlikuju.

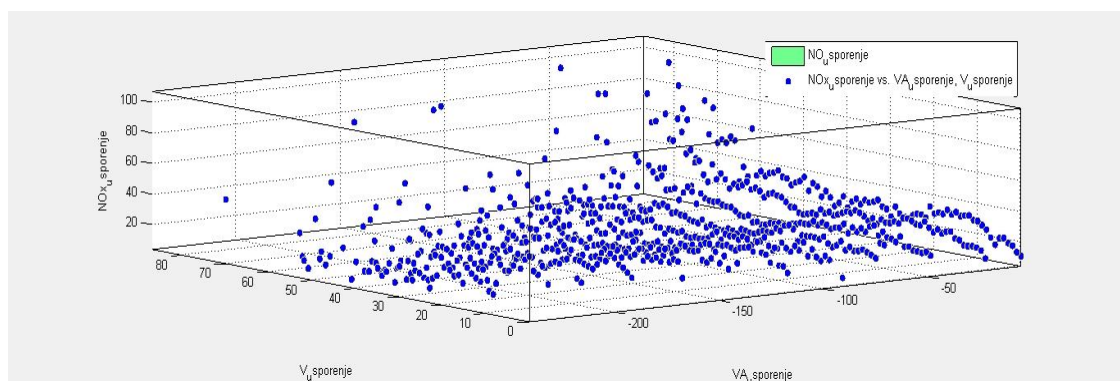
#### Srednje vrednosti emisija azotovih oksida ( $NO_x$ )

U 3D prostoru su prikazani podaci srednjih vrednosti emisije  $NO_x$  u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu ubrzanja (Slika 5-24). Maksimalne emisije  $NO_x$  uzimaju vrednosti do 150 mg/s i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje uzimaju vrednosti od 1 do 80 km/h i potrebna snaga, čije vrednosti su u opsegu od 20 do 240  $km^2/h^2/s$ .



Slika 5-24. Srednje emisije  $NO_x$  pri ubrzanju prikazane u 3D prostoru

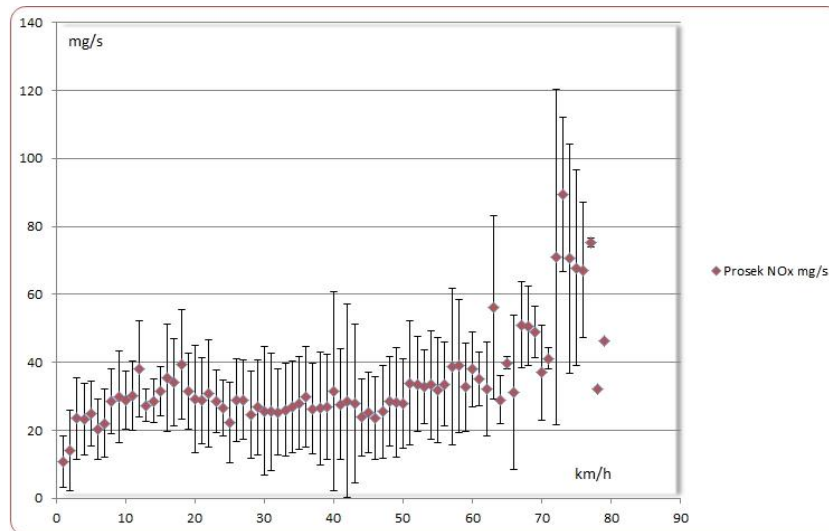
Sledeća slika (Slika 5-25) u 3D prostoru prikazuje srednje vrednosti emisije  $NO_x$  u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu usporenja. Maksimalne emisije  $NO_x$  uzimaju vrednosti do 100 mg/s i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje uzimaju vrednosti od 1 do 80 km/h i potrebna snaga, čije vrednosti su u opsegu od -20 do -240  $km^2/h^2/s$ .



Slika 5-25. Srednje emisije  $NO_x$  pri usporenju prikazane u 3D prostoru



Za vrednosti prosečnih emisija NO<sub>x</sub> u režimu ravnomernog kretanja (bez promene ubrzanja) napravljen 2D grafik (Slika 5-26). Na grafiku su istaknute srednje vrednosti emisija i standardna odstupanja izmerenih vrednosti od srednje vrednosti kojima se prikazuje stepen varijabilnosti podataka. Izmerene vrednosti ukazuju na rastući trend emisija NO<sub>x</sub> sa povećanjem brzine kretanja u uslovima ravnomerne kretanja. Trend je sličan trendu emisija CO.

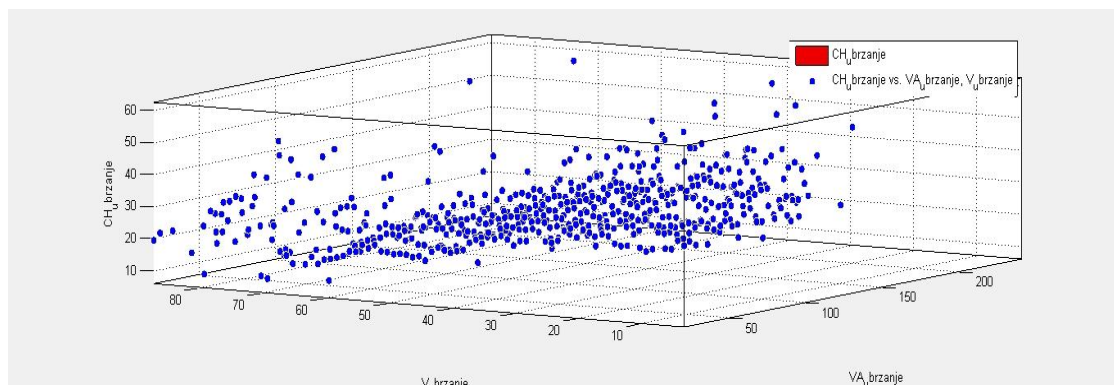


Slika 5-26. Srednje emisije i standardna odstupanja NO<sub>x</sub> pri ravnomernoj vožnji

Emisija NO<sub>x</sub> vozila u mirovanju dobijena je kao prosečna vrednost svih emisija tog režima. Emisije NO<sub>x</sub> u režimu mirovanja iznosi 10.600 mg/s, dok je standardno odstupanje 7.578 mg/s.

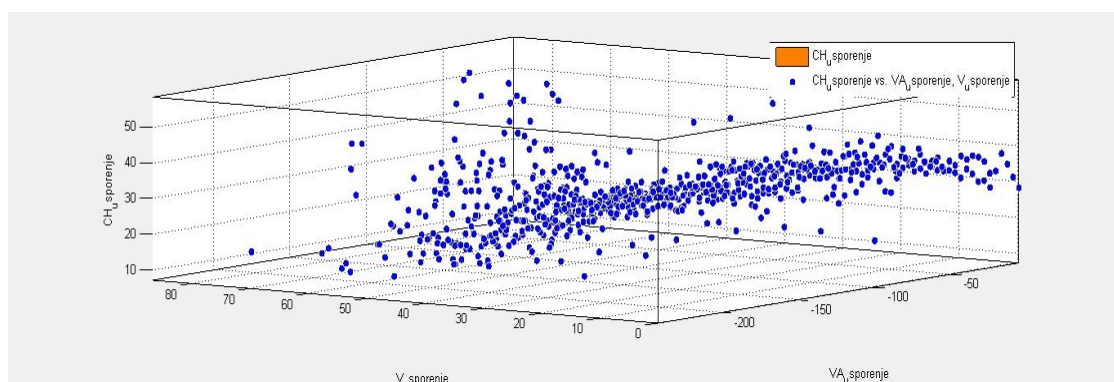
#### *Srednje vrednosti emisija metana (CH<sub>4</sub>)*

Srednje vrednosti emisija CH<sub>4</sub> u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu ubrzanja su prikazane u 3D prostoru (Slika 5-27). Maksimalne emisije CH<sub>4</sub> uzimaju vrednosti do 60 mg/s i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje uzimaju vrednosti od 1 do 80 km/h i potrebna snaga, čije vrednosti su u opsegu od 20 do 240 km<sup>2</sup>/h<sup>2</sup>/s.



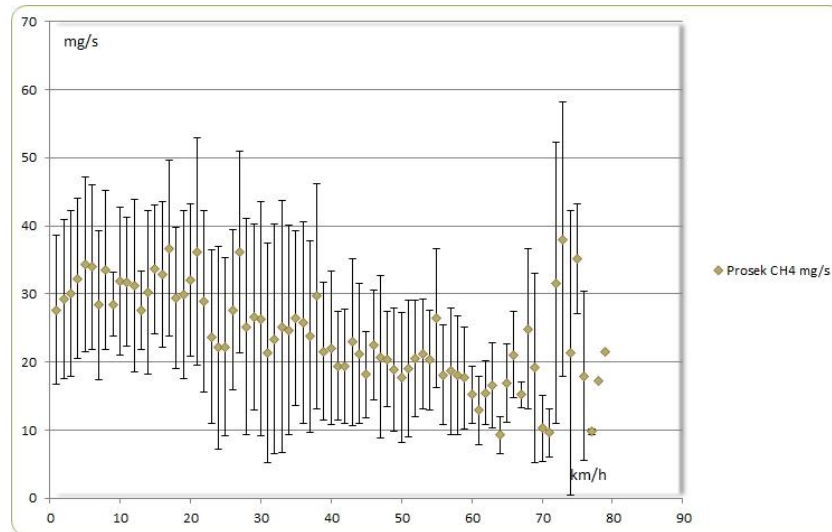
Slika 5-27. Srednje emisije CH<sub>4</sub> pri ubrzanju prikazane u 3D prostoru

U 3D prostoru su prikazane i srednje vrednosti emisije CH<sub>4</sub> u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu usporenja (Slika 5-28). Maksimalne emisije CH<sub>4</sub> uzimaju vrednosti do 50 mg/s i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje uzimaju vrednosti od 1 do 80 km/h i potrebna snaga, čije vrednosti su u opsegu od -20 do -240 km<sup>2</sup>/h<sup>2</sup>/s.



Slika 5-28. Srednje emisije CH<sub>4</sub> pri usporenju prikazane u 3D prostoru

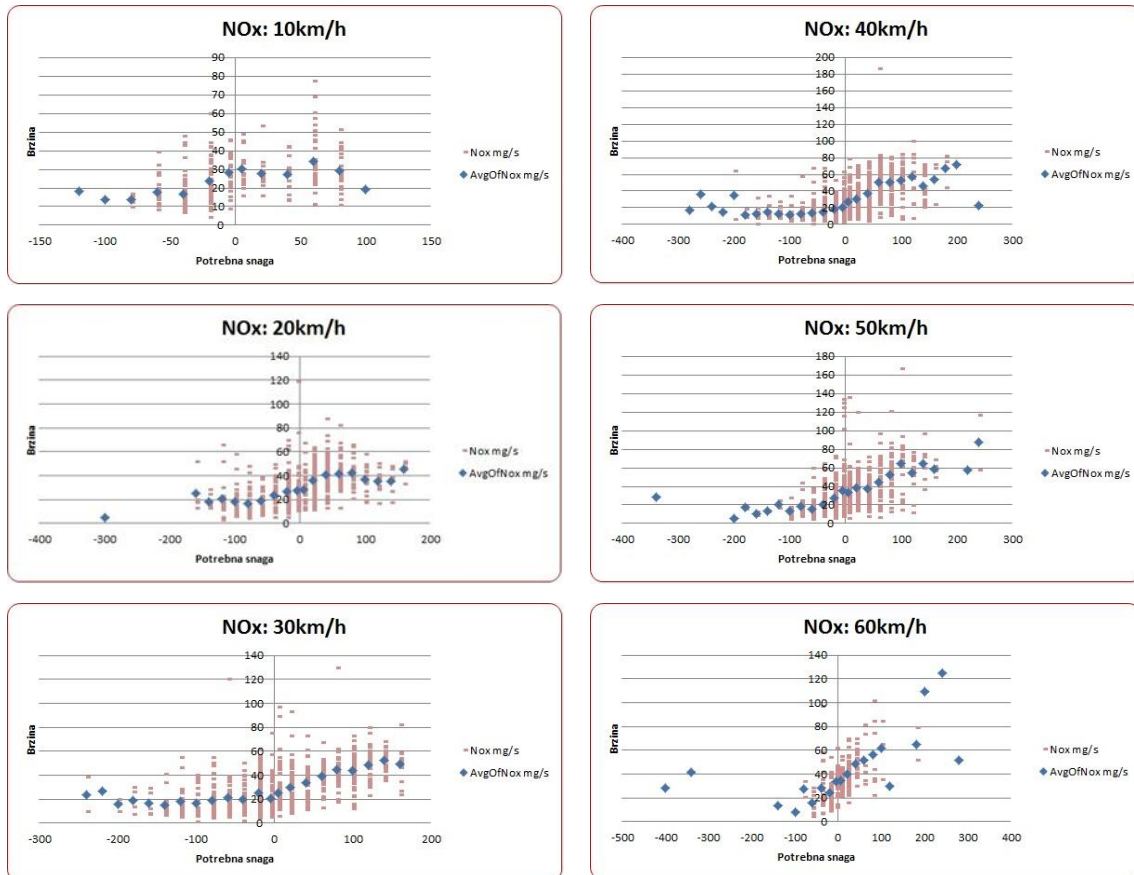
Formiran je 2D grafik za prikaz vrednosti prosečnih emisija CH<sub>4</sub> u režimu ravnomernog kretanja (bez promene ubrzanja) (Slika 5-29). Na grafiku su istaknute srednje vrednosti emisija i standardna odstupanja izmerenih vrednosti od srednje vrednosti kojima se prikazuje stepen varijabilnosti podataka. Izmerene vrednosti emisija CH<sub>4</sub> sa povećanjem brzine kretanja u uslovima ravnomerne kretanja ukazuju na opadajući trend.



Slika 5-29. Srednje emisije i standardna odstupanja  $\text{NO}_x$  pri ravnomernoj vožnji

Emisija  $\text{CH}_4$  vozila u mirovanju dobijena je kao prosečna vrednost svih emisija tog režima. Emisije  $\text{CH}_4$  u režimu mirovanja iznosi 27.632 mg/s, dok je standardno odstupanje 10.922 mg/s.

Na sledećem nizu grafičkih priloga je prikazana promena srednjih vrednosti emisija pri konstantnim brzinama (10, 20, 30, 40, 50 i 60 km/h) (Slika 5-30. Uporedni prikaz emisija u zavisnosti od potrebne snage za fiksne brzine). Pored srednjih vrednosti prikazane su i sve izmerene vrednosti. Prikaz je dobra ilustracija promena emisija koje se dešavaju u različitim uslovima u saobraćajnom toku.



Slika 5-30. Uporedni prikaz emisija u zavisnosti od potrebne snage za fiksne brzine. Sa porastom brzine raste i vrednost prosečne emisije  $\text{NO}_x$  pri ubrzanju i opadanje vrednosti pri usporenju. Vrednosti pri usporenju su relativno konstantne sa porastom intenziteta usporenja (odnosno potrebne snage) dok pri ubrzanju sa porastom potrebne snage raste i nivo emisije.

## **6 Režimski model emisija**

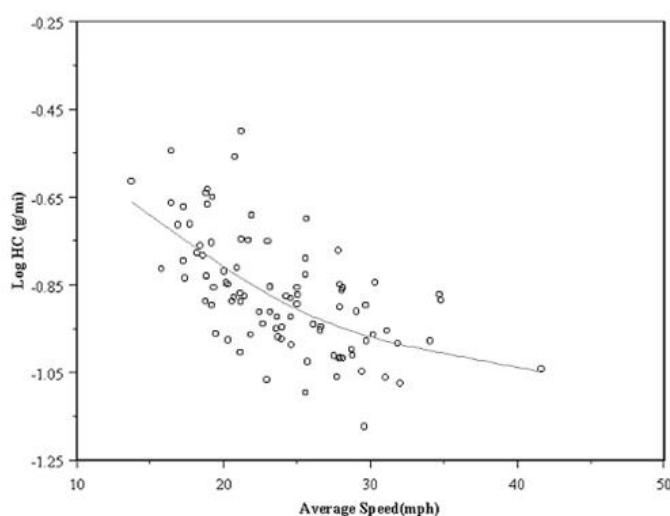
U poglavljima 4 i 5 disertacije predstavljeni su svi potrebni elementi za razvoj režimskog emisionog modela. U poglavlju 4 su razmotrene sve karakteristike različitih tipova režimskih modela i odabran tip koji će biti razvijen u nastavku. U poglavlju 5 je na osnovu odabranog modela formirana metodologija istraživanja koja je omogućila prikupljanje potrebnih podataka. U istom poglavlju izvršena je i korekcija i usaglašavanje rezultata istraživanja po vremenskoj osi. Na kraju su predstavljeni prikupljeni podaci koji čine bazu podataka za razvoj režimskog emisionog modela koji se zasniva na podacima o emisijama u svakoj sekundi kretanja vozila. U narednom poglavlju prvo su razmotrena neka opšta pitanja u vezi sa definisanjem tipa modela i problema preciznosti i varijabilnosti modela. Zatim su predstavljeni i osnovni statistički pokazatelji koji su korišćeni za ocenu kvaliteta modela, a zatim je definisan model.

Razvoj modela je iterativni postupak koji uključuje razmatranje fizičkih i empirijskih (statistički značajnih) odnosa primećenih u realnim podacima, na osnovu prethodnih teorijskih postavki. Pri ocenjivanju nekog skupa podataka i pri razvoju modela, važno je početi od hipoteze u odnosu na veze koje postoje, a na osnovu fizičkih odnosa. Na primer, parametarski eksperimenti u laboratorijskim uslovima mogu da daju indikaciju o tome šta su ključni faktori osetljivosti emisija, kao što su opterećenja motora, broj obrtaja motora, temperatura vazduha, dodatna oprema, itd. Poznavanje ovih faktora je važno za identifikovanje nezavisnih ili ulaznih promenljivih u početnom stadijumu razvoja modela. U ovom istraživanju nije bilo moguće izvođenje laboratorijskih ispitivanja pa je hipoteza bila zasnovana na dostupnim podacima iz dosadašnje prakse.

S druge strane, modele treba razvijati na osnovu ulaznih podataka koji su lako dostupni. Važno je obuhvatiti promenljive koje su izvedene iz ključnih fizičkih promenljivih (Rouphail et al, 2000.). Zato su u ovoj disertaciji uzete u obzir i analizirane samo ključne relacije između brzine, potrebne snage i emisija.

U radu sa podacima visokog nivoa preciznosti uvek postoji mogućnost analize podataka na način da se uzmu u obzir ključne promenljive mikro ili mezo podataka koje takođe utiču na emisije na makro nivou. Realne emisije često su pod uticajem

lokalnih maksimalnih emisija. Makroskopske emisije mogu biti pod uticajem maksimalnih vrednosti potrošnje goriva ili potrebne snaga, pre nego prosečnih vrednosti. Istovremeno je moguće analizirati efekte promenljivih koje utiču na promene prosečnih parametara putovanja. Relacije između emisija i promenljivih kao što su prosečna brzina putovanja i prosečna ambijentalna temperatura mogu da budu primer za ovu vrstu analize. Prikazan je primer odnosa između prosečne brzine na koridoru i emisije HC za ponovljene prolaze istog vozila na određenom koridoru (Slika 6-1).

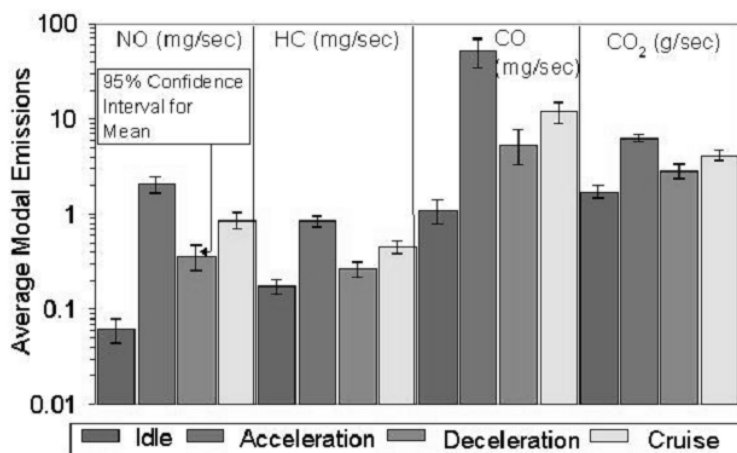


Slika 6-1. Primer makroskopske relacije između prosečne brzine i emisije HC na koridoru (Frey et al. 2001a)

Svaka tačka na slici predstavlja prosečnu emisiju HC na nivou jednog prolaza koridorom, izražene u g/milji u odnosu na prosečnu brzini vožnje u konkretnom prolazu. Emisija HC varira od 0,08 do 0,35 grama po milji, dok brzina varira od 15 do 40 mph (25-65 km/h) za isto vozilo tokom višestrukih prolaza. Postoji inverzni odnos između emisija HC i prosečne brzine, kao što je prikazano neparametarskom regresijom. Postoje i značajna odstupanja od definisanog trenda u podacima što znači da model zasnovan samo na prosečnim brzinama ima ograničenu upotrebnu vrednost i podatke čije vrednosti nije moguće objasniti. Na primer, za određenu prosečnu brzinu opseg varijabilnosti podataka koje nije moguće objasniti je oko 30%.

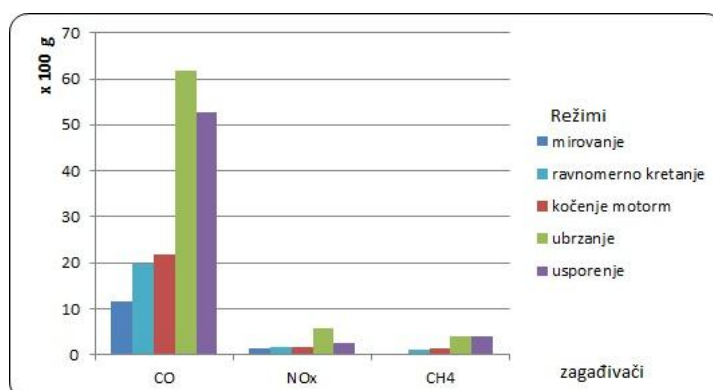
Prethodna istraživanja su pokazala da postoje statistički značajni trendovi između emisije na deonici ili celom putovanju i makroskopskih saobraćajnih pokazatelja, kao što su broj zaustavljanja i vremenski gubici usled upravljačkih mera (Frey et al. 2001a). Između makroskopskih saobraćajnih pokazatelja (kao što je prosečna brzina) i emisija postoji relacija koja se može iskoristiti za uspostavljanje modela. Primarni cilj u disertaciji nije bio razvoj makroskopskih relacija već relacija na višem nivou preciznosti. Makroskopske relacije podrazumevaju velika uopštavanja i gubitak podataka prikupljenih na nivou svake sekunde.

Mezokopska analiza emisija služi za procenu emisija na višem nivou preciznosti koristeći podatke o saobraćajnom toku kao ulazne parametre. Može da postoji preklapanje između mezokopske i mikroskopske analize (US EPA 2002). To je iskorišćeno u disertaciji, tako da će dobijena baza podataka moći da se koristi za modeliranje na mezokopskom kao i makroskopskom nivou. Prosečne vrednosti emisija u različitim režimima su već korišćene u literaturi (Slika 6-2).

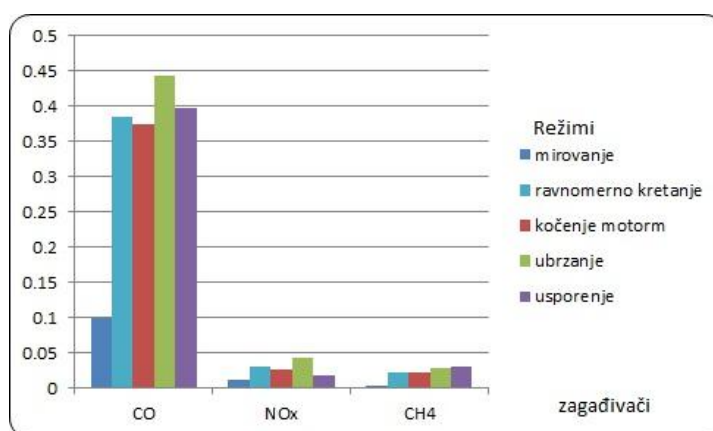


Slika 6-2. Primer srednjih režimskih emisija za osnovne zagađivače (Frey et al. 2002)

Na osnovu toga prikazane su ukupne i srednje emisije u različitim režimima.



Slika 6-3. Režimske emisije osnovnih zagađivača, ukupne emisije

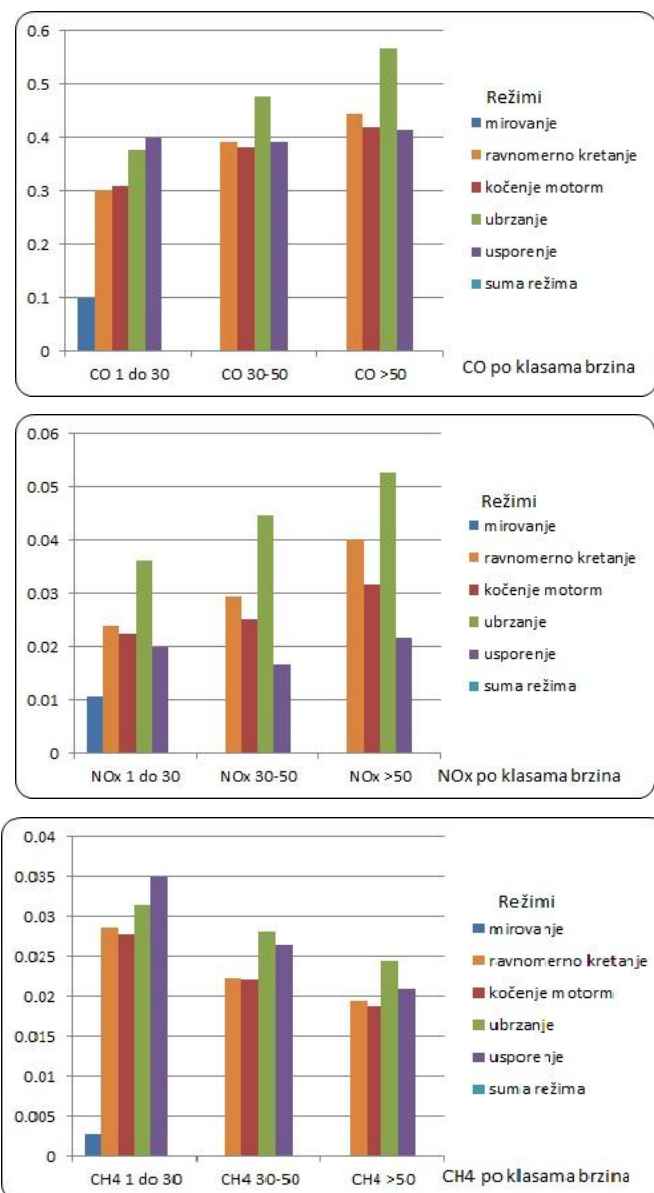


Slika 6-4. Režimske emisije osnovnih zagađivača, prosečne emisije

Sa grafičkog prikaza ukupnih emisija (Slika 6-3) vidi se značajno učešće emisije u stanju mirovanja. Ukupne emisije CO i NO<sub>x</sub> su pod dominantnim uticajem ubrzanja, a na CH<sub>4</sub> podjednako utiču i ubrzanje i usporenje. Prosečne vrednosti emisija su najveće u režimu ubrzanja za CO i NO<sub>x</sub>, a za CH<sub>4</sub> u režimu usporenja (Slika 6-4).

Prikaz je proširen prosečnim emisijama u zavisnosti od kategorije brzina (do 30, 30 do 50 i veće od 50 km/h). Time se prikazuje značaj mezoskopskog pristupa i njegov uticaj na preciznost procene. Ukupne emisije po kategorijama brzina neće biti prikazane jer je njihov značaj i odnos u funkciji frekvencije pojavljivanja određenog režima, što zavisi od ranga saobraćajnice na kojoj se vozila kreću. Prikazane su samo prosečne vrednosti emisija po režimima za sve zagađivače.





Slika 6-5. Režimske emisije CO, NO<sub>x</sub> i CH<sub>4</sub> (respektabilno) po klasama brzina

Prosečne emisije u režimima ubrzanja, ravnomernog kretanja i kočenja motorom rastu sa porastom brzine za CO i NO<sub>x</sub>. Samo kod usporenja, klasa brzina od 30 do 50 km/h ima nešto manje prosečne emisije od ostalih klasa. Kod CH<sub>4</sub>, trendovi su obrnuti, prosečne emisije opadaju sa porastom brzine. Najveća prosečna emisija na malim brzinama (do 30 km/h) nastaje pri usporenju. Pri brzinama većim od 30 km/h prosečne emisije pri ubrzanju su veće od onih pri usporenju.

Rezultati ukazuju da mere planiranja i upravljanja saobraćajem koje smanjuju frekvenciju ili intenzitet ubrzanja utiču na smanjenje negativnog uticaja saobraćaja na životnu sredinu, a modeli omogućavaju kvantifikovanje tog efekta.

Emisije u okviru režima imaju tendenciju da budu slične za isto vozilo, čak i ako se vreme provedeno u okviru režima razlikuje. Razlike u ukupnim emisijama putovanja mogu se pripisati razlikama u raspodeli po različitim režimima vožnje. Tako, pored toga što je koristan rezultat modela, procena emisija različitih režima je važna u razvoju modela i razumevanju faktora koji dovode do razlika u procenama emisija na mezo nivou (Frey et al. 2002).

Konačno, konceptualni model u disertaciji je strukturiran tako da se predvidi emisija u svakoj sekundi kretanja čijim se sumiranjem dobija procena ukupne emisije na celom putovanju. Podaci o karakteristikama promene brzine u svakoj sekundi su dostupni zajedno sa malim brojem drugih varijabli.

Prilikom procena emisija važna je varijabilnost, odnosno neizvesnosti procene. Kada se uporede modelske vrednosti sa realnim vrednostima emisija koje se koriste za validaciju, treba uzeti u obzir preciznost modela. Takođe je važno uzeti u obzir zahtevani kvalitet procene emisija.

Procenjena emisija putovanja se poredi sa izmerenom emisijom putovanja, a razlika između ova dva je indikacija greške modela procene. Međutim, ključno pitanje je da li greška modela procene u konkretnom slučaju u okviru očekivane greške modela. Ako jeste, onda se procena smatra prihvatljivom. Ako nije, onda može da postojati značajno odstupanje koje treba ispitati i ispraviti. Model nije u stanju da generiše procenjene vrednosti emisija bez greške pa je neka greška očekivana.

Mogući uzroci grešaka u modelima uključuju sledeće (Frey et al. 2002):

- Model može biti nepotpun u smislu da nije uključen dovoljan broj varijabli;
- Model nema odgovarajuću funkcionalnu formu;
- Model može biti kalibrisan podacima koji sadrže greške usled merenja;
- Podaci za validaciju mogu sadržati greške usled merenja bilo za nezavisne promenljive i/ili posmatrane emisije;
- Podaci za validaciju mogu biti dobijen pod uslovima značajno različitim od onih koji su korišćeni za kalibraciju modela;
- Greške usled unosa podataka.

Ako su podaci za proveru validnosti dobijeni u drugim uslovima od onih pod kojima su prikupljeni podaci za kalibraciju, model je ekstrapoliran. Prognoze modela koji je ekstrapoliran mogu imati veoma velike greške i/ili da budu besmislene. U razvoju prognoznih podataka za validaciju treba uporediti raspon vrednosti promenljivih u odnosu na one koji se koriste za kalibraciju, da se utvrde potencijalni problemi sa ekstrapolacijom modela (Frey et al. 2002).

Na osnovu rezultata istraživanja izvedeni su zaključci o frekvenciji pojave raznih režimskih stanja u toku vožnje. Na sledećoj slici (Slika 6-6) prikazan je primer jedne emisione mape koja definiše odnos brzine, ubrzanja i emisije. Karakteristično za svaku mapu je korak u kome se menjaju promenljive (u primeru, ubrzanje 0.5 mph/sec, a brzina 5 mph).

		Acceleration (mph/sec)										
Speed (mph)	-6.5	-6	-5.5	-5	-4.5	-4	-3.5	-3	-2.5	-2	-1.5	-1
50	0	0	0	0	0	0	0	0.00101	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0.00101	0	0	0	0.00202
60	0	0	0	0	0	0	0	0.00101	0.00101	0.00101	0.00202	0.00911
65	0	0.00101	0	0	0	0.00202	0	0.00202	0.00304	0.00101	0.00506	0.02935
70	0	0	0	0	0	0.00101	0.00101	0.00101	0.00101	0.00607	0.01012	0.02935
75	0	0	0	0	0	0	0.00101	0	0.00304	0.00304	0.0081	0.01417
80	0	0	0	0	0	0	0	0.00101	0	0.00304	0.00405	0.00506
85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

		Acceleration (mph/sec)										
Speed (mph)	-0.5	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0.0081	0.01215	0.00405	0.00304	0.00101	0.00202	0.00101	0	0	0	0	0
60	0.01619	0.03239	0.01518	0.00202	0.00101	0	0	0	0	0	0	0
65	0.03644	0.08198	0.04453	0.02126	0.00607	0.00202	0.00304	0	0	0	0.00101	0
70	0.05769	0.09615	0.08198	0.02834	0.00607	0.00506	0.00202	0	0.00101	0	0	0
75	0.0496	0.08806	0.04656	0.01417	0.00709	0.00405	0	0	0	0	0.00101	0
80	0.01113	0.01923	0.01417	0.00911	0.00304	0.00101	0.00101	0	0	0	0	0
85	0.00101	0	0	0.00304	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Slika 6-6. Primer emisione mape (brzina(redovi)/ubrzanje(kolone)/emisija)

U priložima su prikazane emisione mape dobijene iz istraživanja. Formirane su mape odnosa brzina/ubrzanje/emisija (Prilog 11) i mapa odnosa brzina/potrebna snaga/emisija (Prilog 8). Emisiona mapa odnosa brzina/potrebna snaga/emisija je iskorišćena za formiranje modela.

Prikazana je raspodela pojavljivanja različitih klasa brzina i potrebnih snaga (Tabela 6-1). Prikazana je raspodela frekvencija potrebnih snaga na primeru skupa koji će biti korišćen za validaciju modela.

Tabela 6-1. Raspodela potrebnih snaga u režimima aktivnosti vozila

<i>klase potrebnih snaga</i>	<i>f-ja</i>	<i>%</i>
-110 do -200	18	0.5%
-60 do -100	156	4.5%
-50	80	2.3%
-40	121	3.5%
-30	155	4.4%
-20	158	4.5%
-10	204	5.8%
0	967	27.6%
10	717	20.5%
20	165	4.7%
30	159	4.5%
40	100	2.9%
50	86	2.5%
60 do 100	297	8.5%
110 do 200	121	3.5%
suma	3504	100.0%

Način agregiranja nezavisnih promenljivih utiče na varijabilnost prognoze emisija. Postoji balans između broja klasa i upotrebne vrednosti modela. Povećanjem broja klasa se dobija preciznija prognoza ali je potreban i veći broj podataka da bi se dobila pouzdana procena za klasu. Posmatraju se razlike između prosečnih vrednosti emisija po klasama. Važan je i obim podataka ili ukupna emisija koja je obuhvaćena klasom. Veći broj klasa može biti definisan da bi se ostvarila manja odstupanja (prihvatljiva gornja granica). S druge strane, moguće redukovati broj klasa tako da i dalje postoji dobra sposobnost za procenu sa prihvatljivim odstupanjem. Prikazana je tabela raspodele ubrzanja po režimskim aktivnostima na primeru skupa koji će biti korišćen za validaciju modela (Tabela 6-2).

Tabela 6-2. Raspodela ubrzanja u režimima aktivnosti vozila

klase ubrzanja	f-ja	%
-11	1	0.0%
-10	1	0.0%
-9	4	0.1%
-8	6	0.2%
-7	10	0.3%
-6	12	0.3%
-5	30	0.8%
-4	51	1.4%
-3	95	2.7%
-2	105	3.0%
-1	243	6.9%
0	1338	37.8%
1	1085	30.6%
2	232	6.5%
3	122	3.4%
4	83	2.3%
5	47	1.3%
6	28	0.8%
7	21	0.6%
8	17	0.5%
9	9	0.3%
10	2	0.1%
suma	3542	100.0%

Poređenjem sa prethodnom tabelom vidi se da agregacija podataka i odabir promenljive imaju snažan uticaj na broj podataka po klasama koje se koriste za modeliranje.

Statistička analiza je izvedena upotrebom standardnih statističkih veličina: Koeficijent determinacije ( $R^2$ ), korigovanog koeficijenta determinacije ( $R^{2*}$ ), Korena srednje kvadratne greške (RMSE) i Suma kvadrata grešaka (SSE).

Za testiranje značajnosti regresionih parametara koristi se odnos ocenjene vrednosti parametra i njegove standardne greške (kvadratni koren izračunate varijanse). U testu značajnosti cele regresije polazi se od podele ukupnih varijacija zavisne promenljive (11) na dva nezavisna sabirka.

$$\sum y_i^2 = \sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2 \quad (11)$$

Ukupna suma varijacija = suma objašnjenih + suma neobjašnjenih

$$\begin{aligned}\sum y_i^2 &= \sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2 = \sum (Y_i - \hat{y}_i + \hat{y}_i + \bar{Y}_i)^2 = \\ &= \sum (e_i - \hat{y}_i)^2 = \sum \hat{y}_i^2 + \sum e_i^2\end{aligned}\quad (12)$$

Deljenjem sa sumom  $y_i$  dobijaju se udeli objašnjenih i neobjašnjenih varijacija u ukupnim.

$$R^2 = \frac{\sum \hat{y}^2}{\sum y^2} = \frac{\sum e^2}{\sum y^2}\quad (13)$$

Mera valjanosti regresije naziva se koeficijent determinacije i računa kao procenat varijacija zavisne varijable Y objašnjenih modelom, i meri udeo objašnjenih u ukupnim varijacijama.

$R^2$  – Koeficijent determinacije (13), se koristi kao opšta mera poklapanja. U statistici se koristi kod statističkih modela čija je osnovna prognoza budućih ishoda na osnovu informacija u vezi sa pojavom. Definisani su kao merilo varijabilnosti u nizu podataka generisanih statističkim modelom. Definiše meru kvaliteta prognoze koja je dobijena modelom. Postoji nekoliko definicija koeficijenta determinisanosti koje su jednoznačne samo pod određenim uslovima. Jedan od takvih slučajeva se tiče koeficijenta korelacije, kada koeficijent determinisanosti predstavlja kvadrat koeficijenta korelacije između vrednosti ulaznih i modelskih vrednosti. U takvim slučajevima vrednosti koeficijenta determinisanosti se nalaze u opsegu od 0 do 1.

Korigovani koeficijent determinacije ( $R^{2*}$ ) je uvek niži od pravog koeficijenta determinacije, utoliko više što je više regresora za isti uzorak (osim za maksimalnu vrednost  $R=1$  kada su jednaki). Izračunava se kao kvadrat koeficijenta determinacije.

RMSE (Root Mean Square Error) – Koren srednje kvadratne greške (14).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=a}^N (C_i - A_i)^2}{N}}\quad (14)$$

Gde je:

$C_i$  – vrednosti iz uzorka

$A_i$  – modelske vrednosti

$N$  – broj uzoraka

Često se koristi kao mera razlike vrednosti dobijenih modelom i snimljenih vrednosti. Objedinjuje sve greške u proceni u jednu veličinu koja predstavlja meru preciznosti procene. Važna je veličina pri međusobnom poređenju dva modela, ali ne i između nezavisne i zavisne promenljive.

SSE (Sum squared errors) – Suma kvadrata grešaka je jedna od mera odstupanja između podataka iz uzorka i modela za procenu. Male vrednosti pokazuju dobro poklapanje modela u odnosu na podatke iz uzorka.

## **6.1 Definisane modele**

Model je napravljen u excel-u i omogućava procenu emisija za bilo koje podatke o načinu vožnje koji su predstavljeni na osnovu para brzine i potrebne snage. Jedinice u kojima je brzina izražena su km/h, a potrebna snaga u  $\text{km}^2/\text{h}^2/\text{s}$ .

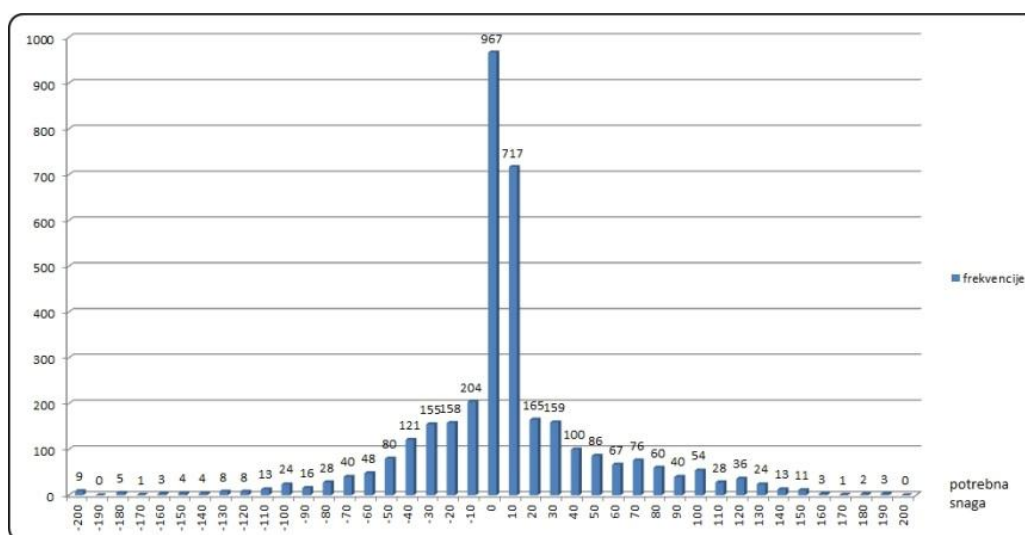
U prvom koraku formiranja modela ispitane su zakonitosti kojima se može definisati odnos brzine, potrebne snage i emisija.

Modeliranje je rađeno u MATLAB-u. Pripremljene su baze podataka koje objedinjavaju sve podatke o emisijama pri različitim režimima. Fajlovi su učitani u MATLAB da bi se formirale promenljive koje mogu biti predstavljene na 3D graficima. Na osnovu grafika definisane su jednačine površi koje prate promene izmerenih vrednosti emisija. Jednačine površi su definisane upotrebom polinoma četvrtog stepena i metode najmanjih apsolutnih razlika.

Ekstremne vrednosti imaju jak uticaj na poklapanje izmerenih i modelskih vrednosti. Osnovni nedostatak definisanja jednačine površine na osnovu metode najmanjih kvadrata je što velike poremećaje stvaraju vrednosti koje su ekstremne u odnosu na uobičajene vrednosti skupa podataka jer kvadriranje razlike ima tendenciju da uveća efekat ekstremnih vrednosti. Da bi se minimizirao efekat ovih vrednosti može se koristiti robusna regresija metodom najmanjih kvadrata. Jedna

od regresionih metoda je i metoda najmanjih apsolutnih razlika. Ova metoda pomaže u nalaženju površine koja minimizira apsolutne razlike ostataka (pre nego kvadrata razlika). Na taj način ekstremne vrednosti imaju manji uticaj na modelsku površinu. Ova metoda je odabrana jer u izmerenim vrednostima koje služe za definisanje modela postoje značajna standardna odstupanja. Za definisanje jednačina korišćeni su samo podaci potrebne snage koji se nalaze između -240 i 240 km<sup>2</sup>/h<sup>2</sup>/s. Na taj način je dodatno redukovano uticaj ekstremnih vrednosti.

Izdvajanje i redukcija baze podataka urađena je korišćenjem raspodele frekvencija pojave potrebnih snaga (Slika 6-7).



Slika 6-7. Raspodela frekvencija potrebnih snaga

Raspodela frekvencija ima normalnu raspodelu. Pojavljivanje prekida u normalnoj raspodeli govori o tome da su vrednosti nakon prekida posledica nekog drugog procesa od onog koji se modelira (a to je emisija u uslovima umerene vožnje). Prekidi u raspodeli su očekivani pri ekstremnim vrednostima potrebnih snaga i te podatke treba isključiti iz baze podataka modela (npr. 9 podataka za potrebnu snagu -200 i 5 podataka za -180 koji predstavljaju nagla kočenja).

Kod analize baze na osnovu brzina i ubrzanja podaci su redukovani za vrednosti ubrzanja koje su veće od 9 km/h/s i usporenja koja su veća od -10km/h/s zbog broja uzoraka koji su ostvareni u opsezima ekstremnih kočenja i ubrzanja. Time je utvrđen opseg primenljivosti modela u odnosu na ubrzanje odnosno usporenje i model ne bi trebalo koristiti van prethodno navedenog opsega.



Opšta jednačina funkcije koja opisuje zavisnost emisije od brzine i potrebne snage (za sve osnovne zagađivače CO, NO<sub>x</sub> i CH<sub>4</sub>) je prikazana u formuli (15).

$$f(va, v) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 p_{ij} \cdot (va)^i \cdot v^j \quad (15)$$

gde je:

$v$  – brzina,

$va$  – potrebna snaga,

$p_{ij}$  – koeficijent  $i$

$f(va, v)$  – funkcija emisije koja zavisi od potrebne snage i brzine.

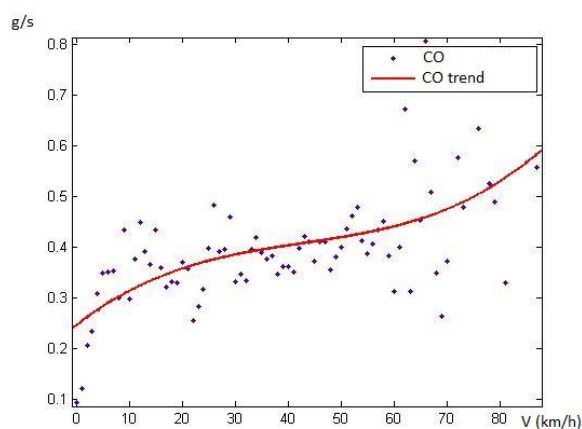
#### Režimski model za CO

Emisija u praznom hodu je definisana kao srednja vrednost dobijena merenjem i iznosi 0.093 g/s, sa standardnim odstupanjem od 0.076 g/s.

Za vožnju ravnomernom brzinom formirana je kriva, polinom trećeg reda. Opšti razvijeni oblik polinoma ima oblik prikazan u jednačini (16).

$$f(va, v) = p_{00} + p_{01}v^1 + p_{02}v^2 + p_{03}v^3 \quad (16)$$

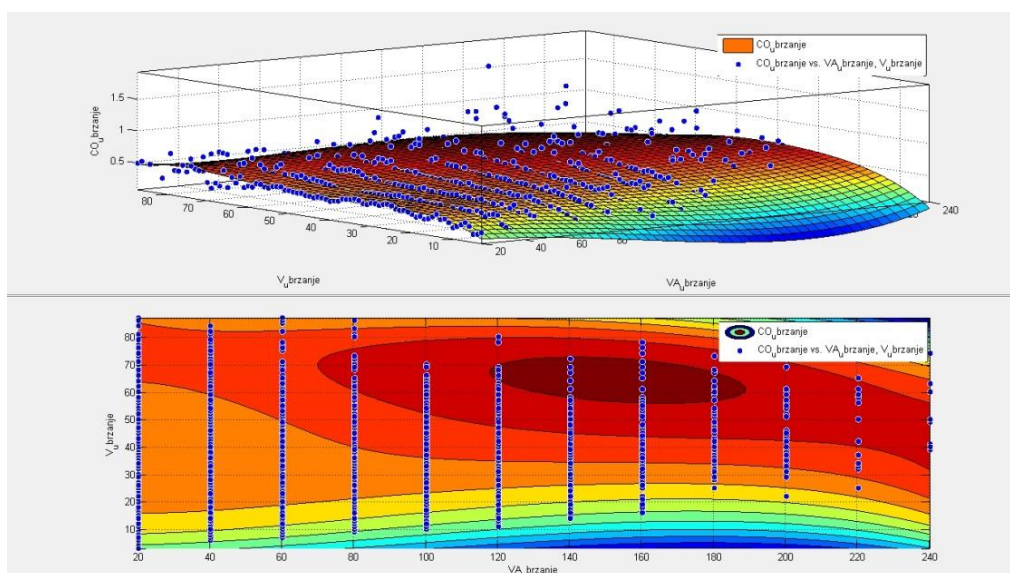
Na slici je prikazana zavisnost zavisnosti brzine (x osa) i emisije CO (y osa) u uslovima ravnomerne vožnje (Slika 6-8).



Slika 6-8. Kriva zavisnosti brzine i emisije CO u uslovima ravnomerne vožnje

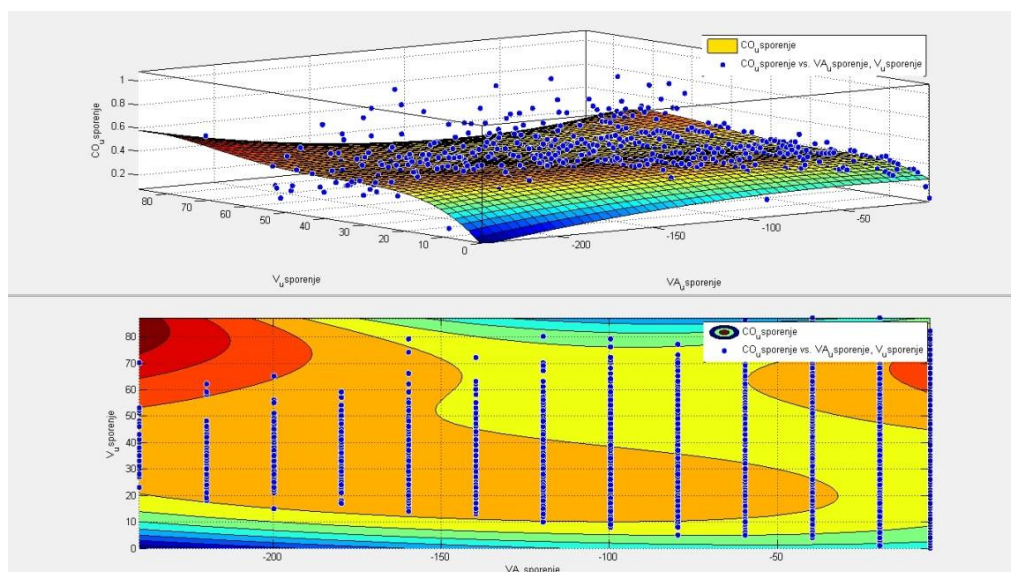
Na narednim graficima prikazane su modelske površine koje prate podatke snimljene u uslovima ubrzanja i usporenja. Na osnovu definisanih površina generisane su jednačine površina.

U 3D prostoru su prikazani podaci srednjih vrednosti emisije CO u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu ubrzanja i površina koja opisuje snimljene podatke. Emisije CO su izražene u g/s i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje su izražene u km/h i potrebna snaga izražena u opsegu  $\text{km}^2/\text{h}^2/\text{s}$ . Gornji deo slike definiše modelsku površinu u 3D prostoru dok je na donjoj slici emisija svedena na obojene površine (Slika 6-9). Maksimalne emisije CO su zabeležene u rasponu brzine od 60 do 70 km/h i potrebnih snaga od 120 do 190  $\text{km}^2/\text{h}^2/\text{s}$ . Primetan je i trend porasta emisije CO sa porastom brzine.



Slika 6-9. 3D model emisije CO za režim ubrzanja

U 3D prostoru su prikazani i podaci srednjih vrednosti emisije CO u režimu usporenja i površina koja opisuje snimljene podatke. Emisije CO su prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine i potrebna snaga. Gornji deo slike definiše modelsku površinu u 3D prostoru dok je na donjoj slici emisija svedena na obojene površine (Slika 6-10). Primetan je i trend porasta emisije CO sa porastom intenziteta kočenja odnosno usporenja. Ovaj rezultat možda nije u skladu sa očekivanim rezultatima. Manja opterećenja motora pri većim intenzitetima kočenja ipak proizvode veće emisije.



Slika 6-10. 3D model emisije CO za režim usporenja

Definisanjem krivih i površina koje najbolje opisuju snimljene podatke generisani su koeficijenti matematičkih jednačina režimskog modela (Tabela 6-3).

Tabela 6-3. Koeficijenti režimskog modela za CO

Koeficijenti	Mirovanje	Ravnomerna	Ubrzanje	Usporenje
p00	0.093	0.2452	0.05848	0.2633
p10	0	0	-7.35E-6	-0.00064
p01	0	1.23E-06	0.04185	0.01459
p20	0	0	-4.00E-5	-7.34E-6
p11	0	0	4.19E-5	-5.51E-5
p02	0	-0.0001575	-0.00169	-0.00068
p30	0	0	6.62E-8	-8.44E-9
p21	0	0	1.37E-6	1.69E-7
p12	0	0	2.05E-7	2.49E-6
p03	0	0.008289	2.69E-5	1.32E-5
p40	0	0	3.53E-10	-1.72E-11
p31	0	0	-5.44E-9	2.17E-10
p22	0	0	1.14E-9	1.73E-9
p13	0	0	-1.83E-8	-1.58E-8
p04	0	0	-1.40E-7	-8.27E-8

Dobijena su poklapanja koja su izražena statističkim pokazateljima koji su predstavljeni u tabeli (Tabela 6-4).

Tabela 6-4. Statistički pokazatelji poklapanja modela sa emisijama CO

	Mirovanje	Ravnomerna vožnja	Ubrzanje	Usporenje
RMSE – srednja kvadratna greška	X	0.09177	0.06997	0.046
SSE – suma kvadrata grešaka	X	0.6316	2.845	1.486
R2 - Koeficijent determinacije	X	0.3658	0.8647	0.7916
R2* – Korigovani koeficijent determinacije	X	0.3404	0.8614	0.7875

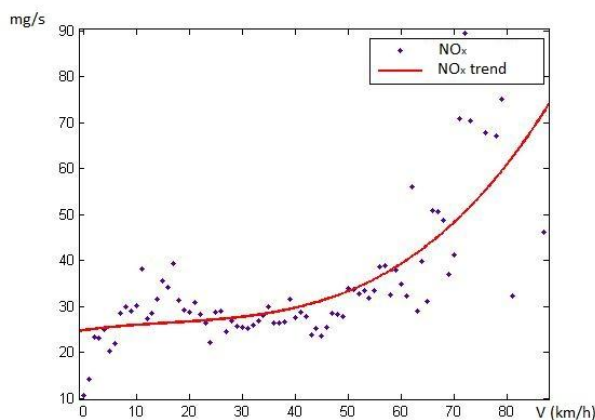
Koeficijent determinacije za model ubrzanja i usporenja ukazuje na relativno dobar model procene. Kod režima ravnomerne vožnje vrednost ovog koeficijenta je mala (oko 37%) zbog velikih razlika u izmerenim vrednostima koje su posledica širokog opsega potrebne snage koji ovaj režim obuhvata (0 do 5 km<sup>2</sup>/h<sup>2</sup>/s). Upotreba krive višeg stepena ne donosi značajnu razliku u koeficijentu determinacije pa je postojeći model usvojen kao prihvatljiv.

#### Režimski model za NO<sub>x</sub>

Emisija u praznom hodu je definisana kao srednja vrednost dobijena merenjem i iznosi 10.6 mg/s, sa standardnim odstupanjem od 7.578 mg/s.

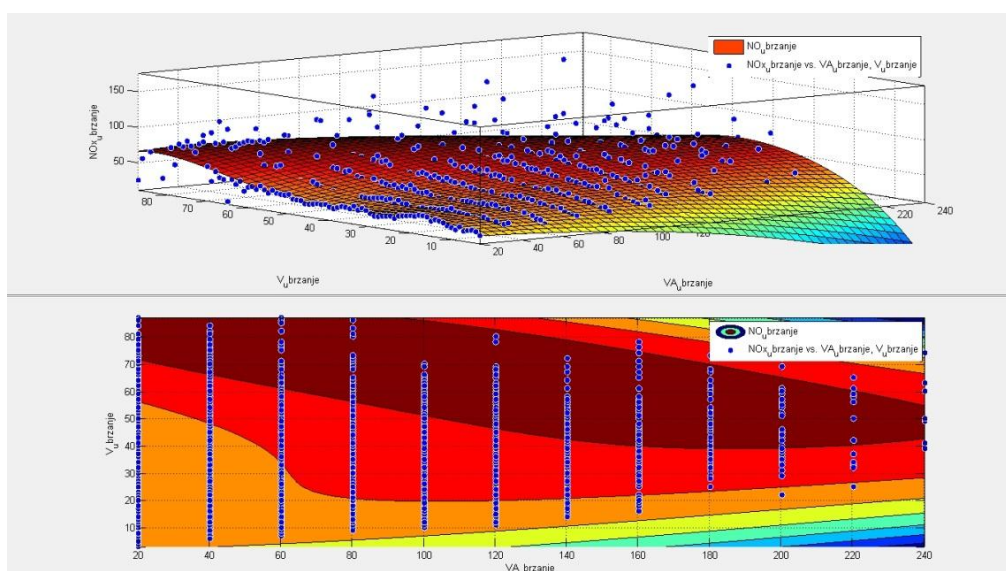
Za vožnju ravnomernom brzinom formirana je kriva, polinom trećeg reda. Opšti razvijeni oblik polinoma ima oblik kao u formuli (16).

Na slici je prikazana zavisnost zavisnosti brzine (x osa) i emisije NO<sub>x</sub> (y osa) u uslovima ravnomerne vožnje (Slika 6-11).

Slika 6-11. Kriva zavisnosti brzine i emisije NO<sub>x</sub> u uslovima ravnomerne vožnje

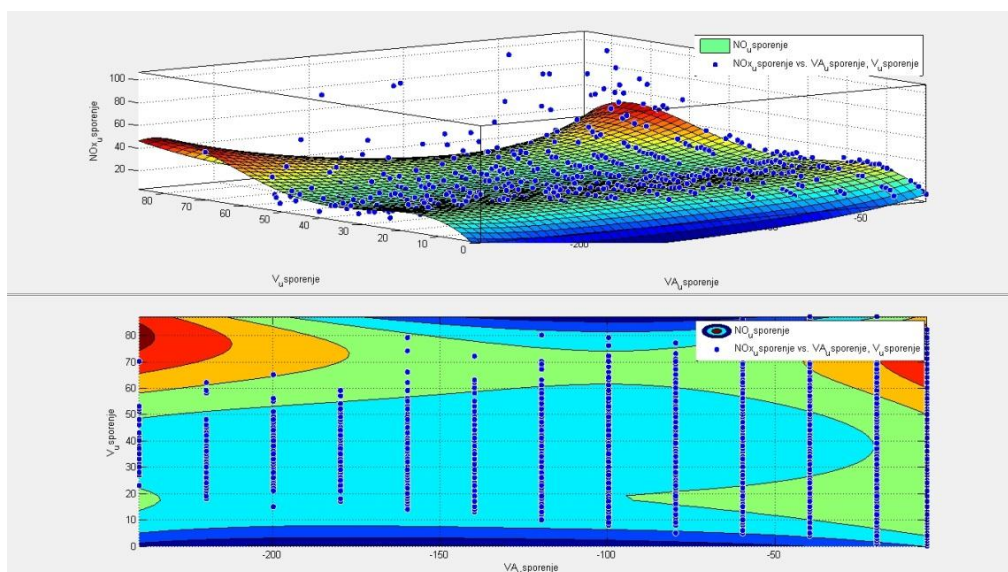
Na narednim graficima prikazane su modelske površine koje prate podatke snimljene u uslovima ubrzanja i usporenja. Na osnovu definisanih površina generisane su jednačine površina.

U 3D prostoru su prikazani podaci srednjih vrednosti emisije  $\text{NO}_x$  u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu ubrzanja i površina koja opisuje snimljene podatke. Emisije  $\text{NO}_x$  su izražene u  $\text{mg/s}$  i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje su izražene u  $\text{km/h}$  i potrebna snaga izražena u opsegu  $\text{km}^2/\text{h}^2/\text{s}$ . Gornji deo slike definiše modelsku površinu u 3D prostoru dok je na donjoj slici emisija svedena na obojene površine (Slika 6-12). Maksimalne emisije  $\text{NO}_x$  su zabeležene pri velikim brzinama i potrebnim snagama.



Slika 6-12. 3D model emisije  $\text{NO}_x$  za režim ubrzanja

U 3D prostoru su prikazani i podaci srednjih vrednosti emisije  $\text{NO}_x$  u režimu usporenja i površina koja opisuje snimljene podatke. Emisije  $\text{NO}_x$  su prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine i potrebna snaga. Gornji deo slike definiše modelsku površinu u 3D prostoru dok je na donjoj slici emisija svedena na obojene površine (Slika 6-13). Karakterističan je relativno konstantan trend emisije  $\text{NO}_x$  za brzine oko  $40 \text{ km/h}$  i promenu usporenja.

Slika 6-13. 3D model emisije NO<sub>x</sub> za režim usporenja

Definisanjem krivih i površina koje najbolje opisuju snimljene podatke generisani su koeficijenti matematičkih jednačina režimskog modela (Tabela 6-5).

Tabela 6-5. Koeficijenti režimskog modela za NO<sub>x</sub>

Koeficijenti	Mirovanje	Ravnomerna	Ubrzanje	Usporenje
p00	10.6	24.79	17.86	12.63
p10	0	0	-0.1345	0.4233
p01	0	0.1612	2.764	2.899
p20	0	0	-0.0001588	0.003561
p11	0	0	0.01067	-0.01116
p02	0	-0.005556	-0.1499	-0.1539
p30	0	0	-7.54E-06	1.73E-05
p21	0	0	4.78E-05	-1.21E-05
p12	0	0	7.85E-05	0.0002926
p03	0	0.0001148	0.002688	0.002956
p40	0	0	1.01E-08	3.56E-08
p31	0	0	3.12E-08	8.91E-08
p22	0	0	-9.55E-07	8.24E-07
p13	0	0	-1.63E-06	-8.39E-07
p04	0	0	-1.45E-05	-1.76E-05

Dobijena su poklapanja koja su izražena statističkim pokazateljima koji su predstavljeni u tabeli (Tabela 6-6).

Tabela 6-6. Statistički pokazatelji poklapanja modela sa emisijama NO<sub>x</sub>

	Mirovanje	Ravnomerna vožnja	Ubrzanje	Usporenje
RMSE – srednja kvadratna greška	X	9.403	7.51	4.702
SSE – suma kvadrata grešaka	X	6631	3.28E+04	1.55E+04
R2 - Koeficijent determinacije	X	0.5506	0.8707	0.8565
R2* – Korigovani koeficijent determinacije	X	0.5327	0.8676	0.8536

Koeficijent determinacije za model ubrzanja i usporenja ukazuje na relativno dobar model procene (vrednosti veće od 85%). Kod režima ravnomerne vožnje vrednost ovog koeficijenta je manja (oko 55%) zbog razlika u izmerenim vrednostima koje su posledica širokog opsega potrebne snage. Ukupno, model je prihvatljiv.

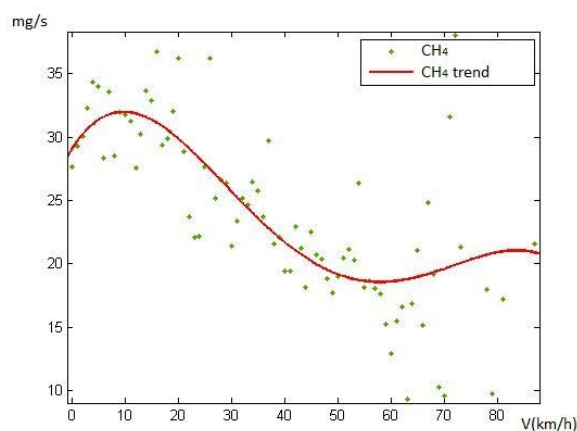
#### Režimski model za CH<sub>4</sub>

Emisija u praznom hodu je definisana kao srednja vrednost dobijena merenjem i iznosi 27.632 mg/s, sa standardnim odstupanjem od 10.922 mg/s.

Za vožnju ravnomernom brzinom formirana je kriva, polinom četvrtog reda. Opšti razvijeni oblik polinoma ima oblik prikazan u formuli (17).

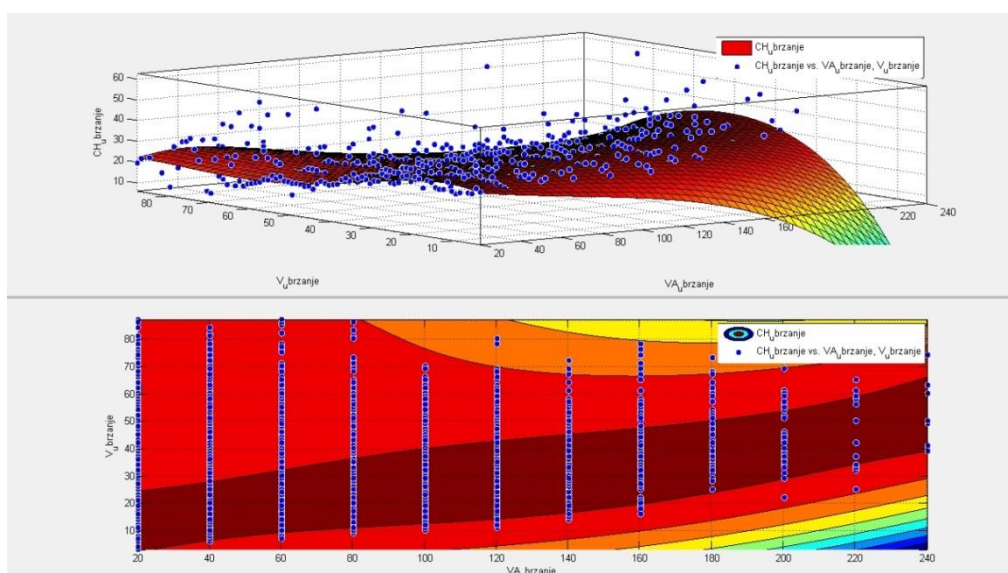
$$f(v, v) = p_{00} + p_{01}v^1 + p_{02}v^2 + p_{03}v^3 + p_{04}v^4 \quad (17)$$

Na slici je prikazana zavisnost zavisnosti brzine (x osa) i emisije CH<sub>4</sub> (y osa) u uslovima ravnomerne vožnje.

Slika 6-14. Kriva zavisnosti brzine i emisije CH<sub>4</sub> u uslovima ravnomerne vožnje

Na narednim graficima prikazane su modelske površine koje prate podatke snimljene u uslovima ubrzanja i usporenja. Na osnovu definisanih površina generisane su jednačine površina.

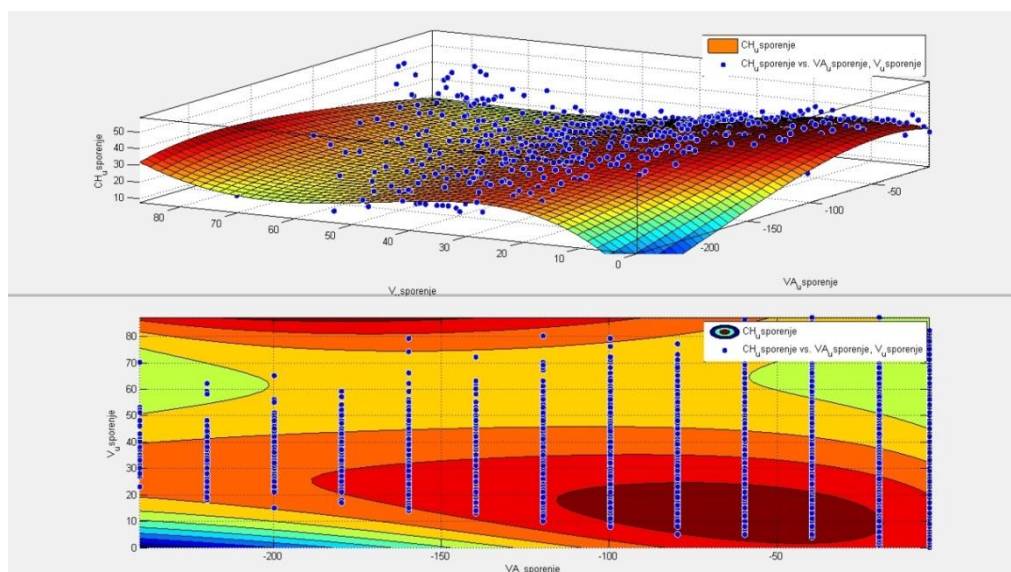
U 3D prostoru su prikazani podaci srednjih vrednosti emisije  $\text{NO}_x$  u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu ubrzanja i površina koja opisuje snimljene podatke. Emisije  $\text{CH}_4$  su izražene u  $\text{mg/s}$  i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje su izražene u  $\text{km/h}$  i potrebna snaga izražena u opsegu  $\text{km}^2/\text{h}^2/\text{s}$ . Gornji deo slike definiše modelsku površinu u 3D prostoru dok je na donjoj slici emisija svedena na obojene površine (Slika 6-15). Maksimalne emisije  $\text{CH}_4$  su zabeležene pri malim brzinama i rastu sa porastom potrebne snage.



Slika 6-15. 3D model emisije  $\text{CH}_4$  za režim ubrzanja

U 3D prostoru su prikazani i podaci srednjih vrednosti emisije  $\text{CH}_4$  u režimu usporenja i površina koja opisuje snimljene podatke. Emisije  $\text{CH}_4$  su prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine i potrebna snaga. Gornji deo slike definiše modelsku površinu u 3D prostoru dok je na donjoj slici emisija svedena na obojene površine (Slika 6-16). Karakteristične su veće emisije pri malim brzinama. Sa porastom brzine i smanjenjem potrebne snage (odnosno jačeg usporenja) opada emisija  $\text{CH}_4$ .



Slika 6-16. 3D model emisije CH<sub>4</sub> za režim usporenja

Definisanjem krivih i površina koje najbolje opisuju snimljene podatke generisani su koeficijenti matematičkih jednačina režimskog modela (Tabela 6-7).

Tabela 6-7. Koeficijenti režimskog modela za CH<sub>4</sub>

Koeficijenti	Mirovanje	Ravnomerna	Ubrzanje	Usporenje
p00	27.632	29	32.87	29.19
p10	0	0	-0.2324	-0.252
p01	0	0.6755	0.517	0.4666
p20	0	0	0.001159	-0.003715
p11	0	0	0.01486	-0.003416
p02	0	-0.04477	-0.04244	-0.0335
p30	0	0	-2.59E-06	-1.07E-05
p21	0	0	-6.31E-05	5.91E-05
p12	0	0	-0.0001128	0.0001953
p03	0	0.000727	0.0006699	0.0005108
p40	0	0	-2.22E-08	-1.03E-08
p31	0	0	3.31E-07	9.72E-08
p22	0	0	-3.82E-07	-2.42E-07
p13	0	0	4.38E-07	-1.67E-06
p04	0	-3.60E-06	-3.20E-06	-2.37E-06

Dobijena su poklapanja koja su izražena statističkim pokazateljima koji su predstavljeni u tabeli (Tabela 6-8).

Tabela 6-8. Statistički pokazatelji poklapanja modela sa emisijama CH<sub>4</sub>

	<i>Mirovanje</i>	<i>Ravnomerna vožnja</i>	<i>Ubrzanje</i>	<i>Usporenje</i>
RMSE – srednja kvadratna greška	X	4.856	0.8174	3.149
SSE – suma kvadrata grešaka	X	1745	5516	6960
R2 - Koeficijent determinacije	X	0.5348	0.8174	0.863
R2* – Korigovani koeficijent determinacije	X	0.5097	0.813	0.8602

Koeficijent determinacije za model ubrzanja i usporenja ukazuje na relativno dobar model procene. Kod režima ravnomerne vožnje vrednost ovog koeficijenta je manja (oko 53.5%) zbog razlika u izmerenim vrednostima koje su posledica širokog opsega potrebne snage. Ukupno, model je prihvatljiv.

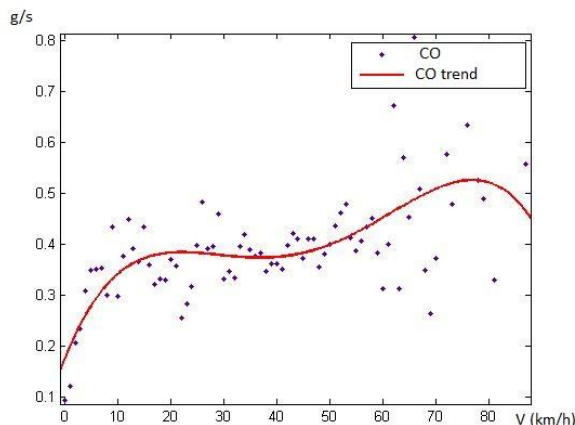
## 6.2 Kalibracija modela

Generisani početni oblik modela je pokazao nepreciznosti u proceni pa je napravljen pokušaj da se model kalibriše radi veće preciznosti. Kalibracije je urađena samo na primeru baze podataka o emisijama CO.

U uslovima ravnomerne vožnje primenjen je polinom četvrtog stepena u odnosu na polinom trećeg stepena. U režimima ubrzanja i usporenja, određeni segmenti brzine modelirani su posebnim jednačinama da bi se dobilo bolje poklapanje sa srednjim vrednostima iz merenja. Tako su formirane klase brzina do 5, 30, 50 i 90 km/h. Definisane klase je zahtevao određeni stepen procene što je osnova kontrolisanog pristupa.

Emisija u režimu mirovanja je ostala ista i iznosi 0.093 g/s, sa standardnim odstupanjem od 0.076. Jednačina emisije u uslovima ravnomerne vožnje je definisana polinomom četvrtog stepena kao u jednačini (17).

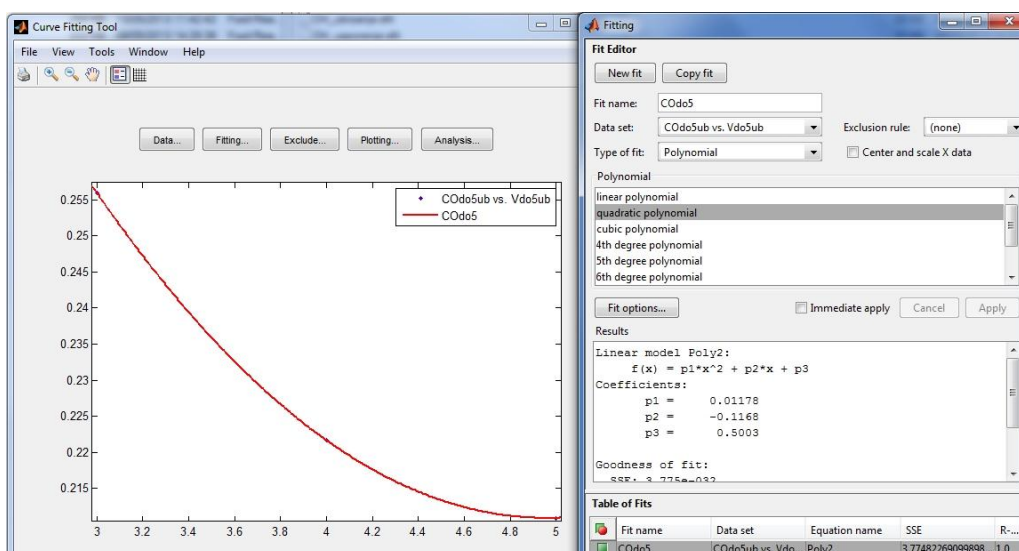
Na slici je prikazana zavisnost brzine (x osa) i emisije CO (y osa) u uslovima ravnomerne vožnje (Slika 6-17).



Slika 6-17. Kriva zavisnosti brzine i emisije CO u uslovima ravnomerne vožnje (polinom četvrtog stepena)

Rezultati kalibracije modela po klasama brzina su prikazani u narednim grafičkim priložima. Prikazane su modelske površine koje prate podatke snimljene u režimima ubrzanja i usporenja. Na osnovu definisanih površina generisane su jednačine površina. Korišćena je ista zakonitost, odnosno polinom četvrtog stepena da bi se opisale jednačine segmenata površine ubrzanja i usporenja.

Na narednoj slici je prikazan model za brzine ispod 5 km/h i vožnju pri ubrzanju. S obzirom da se u takvim uslovima ubrza samo jednom vrednošću ubrzanja u jednačini figuriše samo brzina (Slika 6-18).



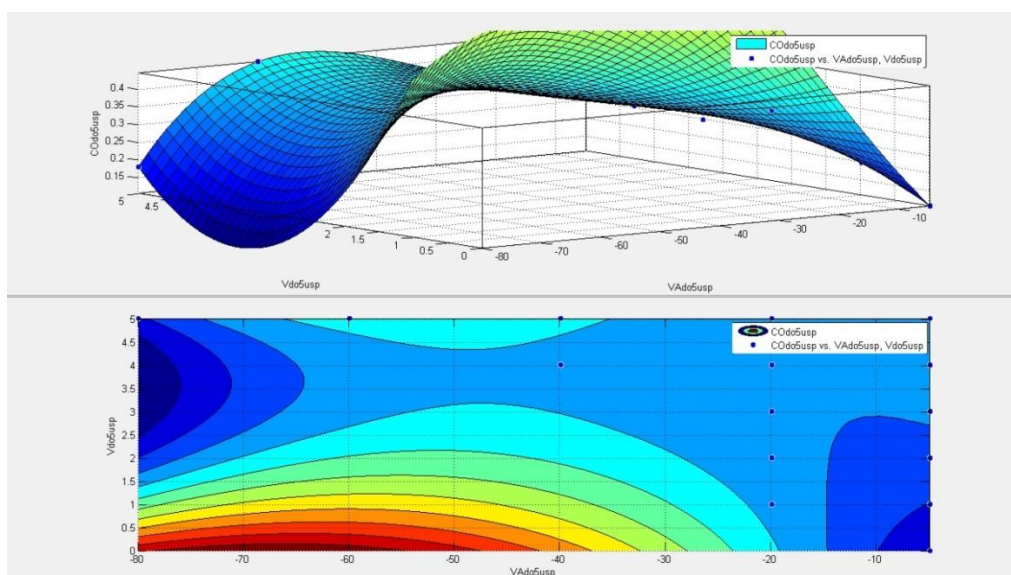
Slika 6-18. Model emisije CO za brzine ispod 5 km/h i vožnju pri ubrzanju

Zakonitost je definisana formulom (18).

$$f(va, v) = 0.5003 - 0.1168 \cdot v + 0.01178 \cdot v^2 \quad (18)$$

Maksimalne emisije CO su zabeležene u rasponu brzine od 60 do 70 km/h i potrebnih snaga od 120 do 190 km<sup>2</sup>/h<sup>2</sup>/s. Primetan je i trend porasta emisije CO sa porastom brzine.

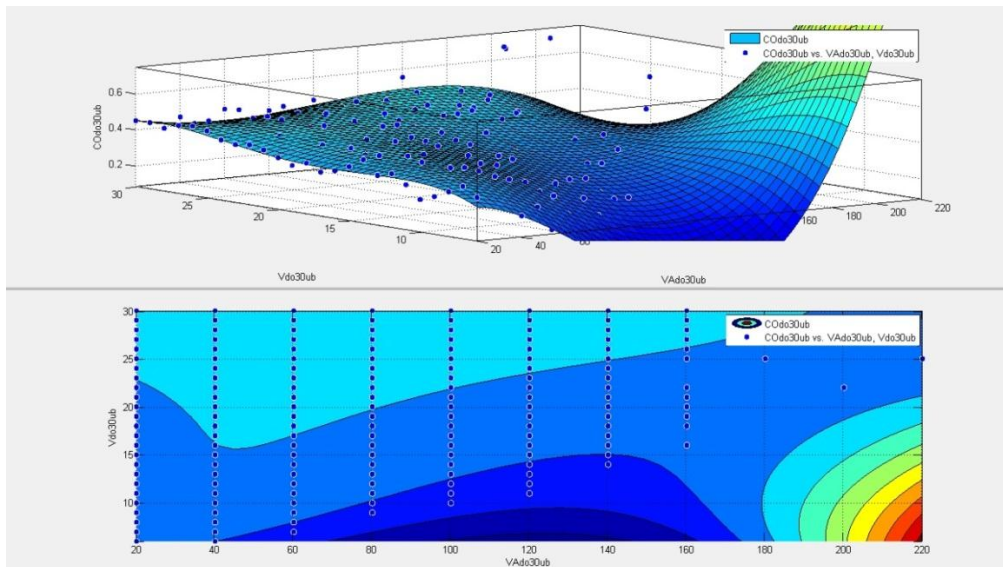
Sledeći grafički prilog u 3D prostoru prikazuje emisiju CO u režimu usporenja i brzinama manjim od 5 km/h (Slika 6-19). Emisije CO su izražene u g/s i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje su izražene u km/h i potrebna snaga izražena u opsegu km<sup>2</sup>/h<sup>2</sup>/s. Gornji deo slike definiše modelsku površinu u 3D prostoru dok je na donjoj slici emisija svedena na obojene površine. Evidentan je mali broj podataka je poslužio za definisanje jednačine površine što utiče na pojavu ekstremnih vrednosti (pozitivnih i negativnih) na delovima površine za koje ne postoje podaci iz istraživanja (crveni i tamni plavi delovi površine). Takvi slučajevi su slabost izvedene kalibracije jer utiču na precenjivanje vrednosti emisija na osnovu modela.



Slika 6-19. Model emisije CO za brzine ispod 5 km/h i vožnju pri usporenju

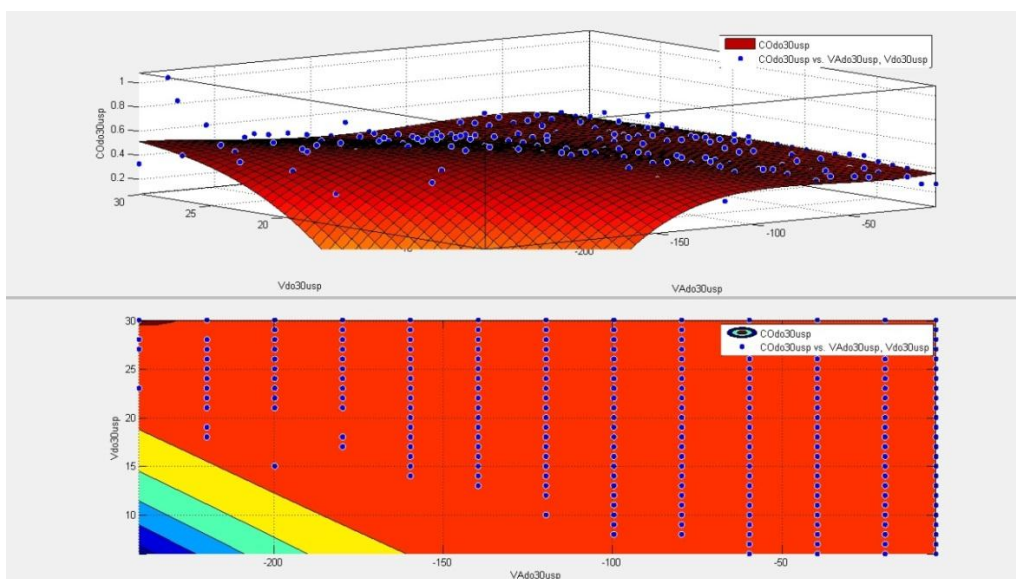
Naredni 3D grafik prikazuje podatke srednjih vrednosti emisije CO u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu ubrzanja i površinu koja opisuje snimljene podatke (Slika 6-20). Emisije CO su izražene u g/s i prikazane su na z osi. Na x i y osi se nalaze brzine koje su izražene u km/h i potrebna snaga izražena u opsegu km<sup>2</sup>/h<sup>2</sup>/s. Gornji deo slike definiše modelsku površinu u 3D prostoru dok je na

donjoj slici emisija svedena na obojene površine. Maksimalne emisije CO dosežu 0.6 g/s. Opseg brzina je ograničen između 5 i 30 km/h.



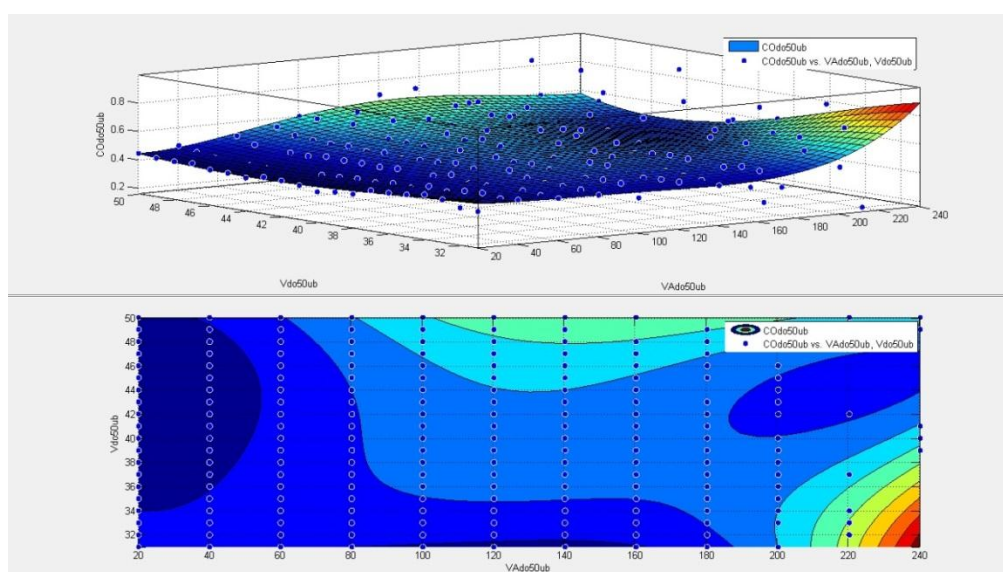
Slika 6-20. Model emisije CO za brzine od 5 do 30 km/h i vožnju pri ubrzanju

Naredni 3D grafik prikazuje podatke srednjih vrednosti emisije CO u zavisnosti od brzine i potrebne snage u režimu usporenja i površinu koja opisuje snimljene podatke (Slika 6-21). Opseg brzina je ograničen između 5 i 30 km/h. Gornji deo slike definiše modelsku površinu u 3D prostoru dok je na donjoj slici emisija svedena na obojene površine. Zabeležene emisije CO su relativno ravnomerne u ovom režimu sa maksimalnim vrednostima do 0.5 g/s.

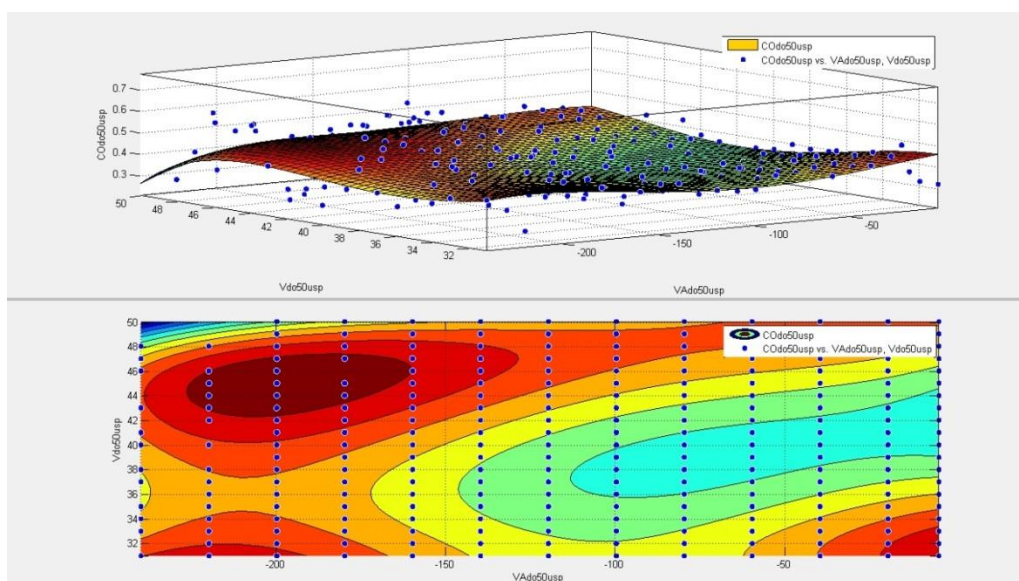


Slika 6-21. Model emisije CO za brzine od 5 do 30 km/h i vožnju pri usporenju

Sledeće slike ilustruju modele za brzine od 30 do 50 km/h i vožnju pri ubrzanju i usporenju. Karakteristično za ovaj skup podataka je postojanje emisija za sve kombinacije brzina i potrebnih snaga (x i y ose). Na 3D grafiku u režimu ubrzanja je karakteristično da su emisije CO veće pri većim brzinama (iznad 35 km/h) ali u opsegu potrebnih snaga (između 80 i 180  $\text{km}^2/\text{h}^2/\text{s}$ ) (Slika 6-22). Na 3D grafiku u režimu usporenja karakteristične su: povećane emisije pri brzina u rasponu od 42 do 47 km/h i potrebnim snagama koje označavaju jaka usporenja; i minimalne emisije CO u opsegu brzina od 36 do 44 km/h i potrebnih snaga manjih od 100  $\text{km}^2/\text{h}^2/\text{s}$  (odnosno slabija usporenja) (Slika 6-23).

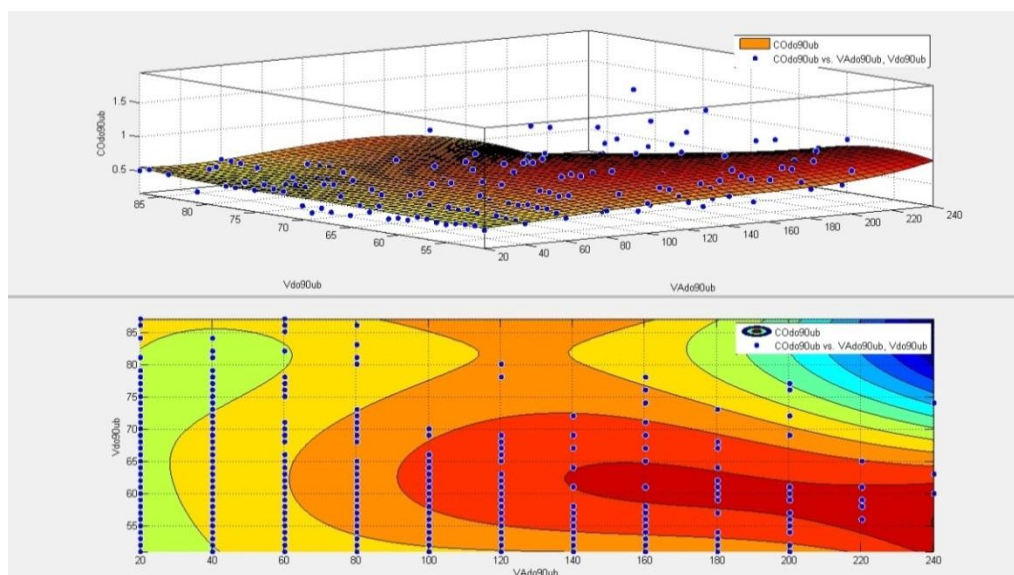


Slika 6-22. Model emisije CO za brzine od 30 do 50 km/h i vožnju pri ubrzanju

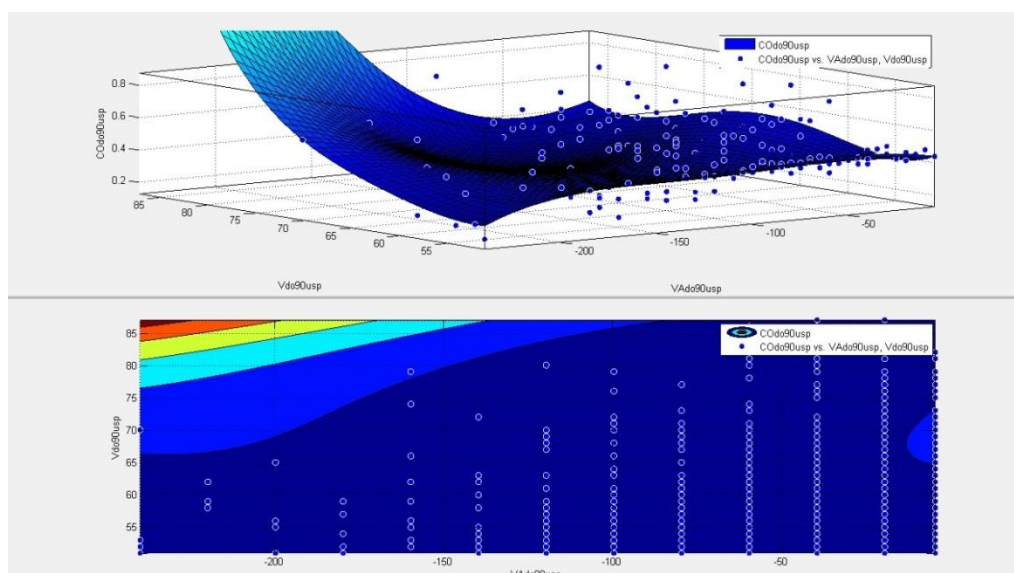


Slika 6-23. Model emisije CO za brzine od 30 do 50 km/h i vožnju pri usporenju

Na narednim grafičkim priložima prikazani su modeli koji su poslužili za generisanje modela za brzine u rasponu od 50 do 90 km/h i vožnju pri ubrzanju i usporenju. 3D grafik kojim se opisuje emisija CO u režimu ubrzanja karakteriše povećanje emisije pri većim potrebnim snagama i rasponu brzina između 55 i 60 km/h (Slika 6-24). Na 3D grafiku kojim se opisuje emisija CO u režimu usporenja je karakteristična veća varijacija snimljenih podataka (Slika 6-25).



Slika 6-24. Model emisije CO za brzine od 50 do 90 km/h i vožnju pri ubrzanju



Slika 6-25. Model emisije CO za brzine od 50 do 90 km/h i vožnju pri usporenju

U tabeli su prikazani svi koeficijenti matematičkih jednačina kalibrisanog režimskog modela (Tabela 6-9).

Tabela 6-9. Koeficijenti kalibrisanog režimskog modela za CO

K	Mir.	Ravnomerna vožnja	Ubrzanje				Usporenje			
			Do 5	5-30	30-50	50-90	Do 5	5-30	30-50	50-90
p00	Sr vr	0.1744	0.5	-0.1562	-1.249	14.71	0.02328	0.399	-22.07	73.74
p10	0	0	0	-0.0037	-0.05544	-0.1126	-0.01493	0.0026	-0.0476	0.09427
p01	0	0.02592	0.0118	0.1302	0.2184	-0.8528	0.158	-0.016	2.317	-4.446
p20	0	0	0	-0.00019	0.0001	-5.80E-5	0.000322	4.04E-5	-3.07E-6	-8.00E-5
p11	0	0	0	0.00187	0.00348	0.005075	0.01117	-0.0001	0.0041	-0.00524
p02	0	-0.001107	-0.117	-0.0138	-0.0089	0.01891	-0.01738	0.0021	-0.0874	0.09952
p30	0	0	0	1.13E-6	-6.82E-9	2.25E-7	4.30E-6	2.47E-7	-1.37E-7	-4.14E-7
p21	0	0	0	3.13E-7	-4.82E-6	1.20E-6	1.92E-5	-5.77E-8	-4.66E-8	-5.88E-7
p12	0	0	0	-7.85E-5	-7.02E-5	-7.27E-5	-0.00131	9.55E-6	-0.00011	8.94E-5
p03	0	1.87E-05	0	0.00057	0.00014	-0.00018	-0.000185	-9.04E-5	0.00143	-0.000975
p40	0	0	0	9.24E-11	9.48E-10	8.37E-10	0	-8.51E-10	-3.50E-10	-6.93E-10
p31	0	0	0	-4.66E-8	-1.03E-8	-1.08E-8	0	-2.47E-8	2.20E-11	1.90E-9
p22	0	0	0	2.85E-7	8.90E-8	1.27E-8	0	-1.45E-7	-5.15E-9	2.23E-8
p13	0	0	0	4.63E-7	4.33E-7	3.23E-7	0	-4.21E-7	9.67E-7	-4.72E-7
p04	0	-1.04E-07	0	-7.76E-6	-7.66E-7	6.77E-7	0	1.18E-6	-8.61E-6	3.53E-6

Za analizu poboljšanja kalibrisanog modela iskorišćeni su isti statistički pokazatelji kao i kod konceptualnog modela: Koeficijent determinacije ( $R^2$ ) i Korigovani koeficijent determinacije ( $R^{2*}$ ), srednja kvadratna greška (RMSE) i suma kvadrata grešaka (SSE).

Tabela 6-10. Statistički pokazatelji poklapanja kalibrisanog modela sa emisijama CO

	Mir	Ravn. vožnja	Ubrzanje				Usporenje			
			Do 5	5-30	30-50	50-90	Do 5	5-30	30-50	50-90
RMSE - srednja kvadratna greška	X	0.0877	0	0.04874	0.07137	0.1337	0.01985	0.05563	0.04452	0.08722
SSE - suma kvadrata grešaka	X	0.5696	0	0.3729	0.9526	3.644	0.00197	0.6933	0.4579	1.537
$R^2$ - Koeficijent determinacije	X	0.428	1	0.8237	0.5988	0.6438	0.9815	0.6644	0.6027	0.5746
$R^{2*}$ - Korigovani koeficijent determinacije	X	0.3971	1	0.808	0.5688	0.6193	0.9482	0.6435	0.5787	0.5451



Koeficijent determinacije ravnomerne vožnje promenjen je sa 0.3658 na 0.428 uz smanjenje srednje kvadratne greške sa 0.09177 na 0.0877 što čini smanjenje od 4.4%. Nepreciznosti konceptualnog modela su kalibrisanjem prenete na klase brzina sa manjim brojem podataka i većim varijacijama između snimljenih vrednosti, odnosno na klasu brzina iznad 50 km/h. To je i najmanje bitna klasa u konkretnom slučaju s obzirom da se radi o modeliranju za urbana područja gde su najčešće brzine kretanja do 50 km/h. Zbirna suma kvadrata grešaka u konceptualnom modelu je iznosila za režim ubrzanja 2.845, a za režim usporenja 1.486. U kalibrisanom modelu u režimu ubrzanja, za brzine od 5 do 30 km/h suma kvadrata grešaka iznosi 0.3729, za brzine od 30 do 50 km/h - 0.9526, a za brzine od 50 do 90 km/h - 3.644. Kod usporenja, u kalibrisanom modelu, suma kvadrata grešaka za brzine od 5 do 30 km/h je iznosila 0.6933, za brzine od 30 do 50 km/h - 0.4579, a za brzine od 50 do 90 km/h – 1.537.

Ovaj način kalibracije modela pokazao se prihvatljivim uz strogu kontrolu ulaznih podataka koji ne smeju da izlaze iz opsega za koji je model razvijen. U suprotnom se može desiti da dobijene vrednosti emisija imaju ekstremne vrednosti.

Za razvoj modela u opštem slučaju je ipak korišćen nekalibrisani model zbog jednostavnosti. Time je prioritet dat eliminisanju ekstremnih rezultata modela u odnosu na povećanje preciznosti prognoze, pošto se i onako radi sa prosečnim vrednostima emisija.

Potencijalna kalibracija podataka za razvoj modela je moguća u oblasti definisanja klasa brzina i potrebnih snaga. Ipak taj pristup nije testiran u ovom radu ali predstavlja zanimljiv materijal za buduća istraživanja (Prilog 5).

### **6.3 Validacija modela**

Početni element validacija modela je provera konzistentnosti kojom se pokazuje da se model može koristiti na kontrolnom skupu podataka za raspodelu emisija po modovima i da je moguće reagregirati emisije modela da se dobiju ukupne emisije putovanja. Osnovno merilo validacije je statistički značaj razlika između snimljenih i prognoziranih vrednosti. Emisije za pojedinačna vozila mogu značajno da variraju čak i kada se vozi isti ciklus, tako da će poređenje na nivou malog broja vozila

uobičajeno imati veće opsege intervala pouzdanosti u odnosu na srednje vrednosti i biće manje pouzdani od poređenja kod većeg broja vozila. Pošto je krajnji cilj precizna procena na nivou celog voznog parka važno je da se kvantitativno objasni nivo neizvesnosti povezan sa procenom srednjih vrednosti modela (Frey, Unal, Chen, et al. 2003).

Set podataka za validaciju obuhvatao je oko 7.2% podataka koji nisu služili za generisanje modela srednjih emisija. Dva seta podataka koji su predstavljali dve vožnje su predstavljali set podataka za validaciju i testiranje modela.

Podaci za validaciju su uneseni u model da bi se dobio niz trenutnih emisija. Podaci su upoređivani sa podacima o izmerenim srednjim vrednostima iz baze podataka na osnovu koje je formiran model. Koeficijent korelacije između podataka dve vremenske serije iznosi 86,86%. Ukupna količina CO na osnovu srednjih vrednosti iz merenja je 1062 g, dok je modelom dobijena vrednost od 1078 g. Razlika između ukupne količine emitovanog CO po modelu i na osnovu merenja iznosi oko 0.6%.

U prilogu je prikazan niz podataka za validaciju modela (Prilog 17). Na grafiku su predstavljene emisije dobijene merenjem, modelom i realne izmerene vrednosti u svakoj sekundi za CO. Vizuelnim poređenjem izmerenih i modelskih vrednosti dobija se zadovoljavajuće poklapanje između dva niza podataka vrednosti (uzevši u obzir i prethodno navedene statističke pokazatelje poklapanja).

Između dva seta podataka, trenutne stvarne emisije i modelske emisije srednjih vrednosti, koeficijent korelacije iznosi 59.22%. Ukupna količina CO na osnovu trenutne stvarne emisije je 872 g, dok je modelom dobijena vrednost od 1068 g. Razlika između ukupne količine emitovanog CO po modelu i na osnovu merenja iznosi 22.5%.

U prilogu je prikazan niz podataka za validaciju modela za NO<sub>x</sub> (Prilog 18). Koeficijent korelacije između podataka dve vremenske serije iznosi 77,98%. Ukupna količina NO<sub>x</sub> na osnovu srednjih vrednosti iz merenja je 82.4g, dok je modelom dobijena vrednost od 86.3g. Razlika između ukupne količine emitovanog NO<sub>x</sub> po modelu i na osnovu merenja iznosi oko 4.8%. Na osnovu navedenih

podataka i vizuelnim poređenjem izmerenih i modelskih vrednosti dobija se zadovoljavajuće poklapanje između dva niza podataka.

Između dva seta podataka, trenutne stvarne emisije i modelske emisije srednjih vrednosti, koeficijent korelacije iznosi 40.91%. Ukupna količina NO<sub>x</sub> na osnovu trenutne stvarne emisije je 100.3g, dok je modelom dobijena vrednost od 86.3g. Razlika između ukupne količine emitovanog NO<sub>x</sub> po modelu i na osnovu merenja iznosi 14.0%.

U prilogu je prikazan niz podataka za validaciju modela za CH<sub>4</sub> (Prilog 19). Koeficijent korelacije između podataka dve vremenske serije iznosi 77,47%. Ukupna količina CH<sub>4</sub> na osnovu srednjih vrednosti iz merenja je 96.6g, dok je modelom dobijena vrednost od 93.8g. Razlika između ukupne količine emitovanog NO<sub>x</sub> po modelu i na osnovu merenja iznosi oko 2.9%. Vizuelnim poređenjem izmerenih i modelskih vrednosti i na osnovu prethodno navedenih statističkih pokazatelja dobija se zadovoljavajuće poklapanje između dva niza podataka.

Između trenutne stvarne emisije i modelske emisije srednjih vrednosti, koeficijent korelacije iznosi 34.18%. Ukupna količina CH<sub>4</sub> na osnovu trenutne stvarne emisije je 76.5g, dok je modelom dobijena vrednost od 93.8g. Razlika između ukupne količine emitovanog CH<sub>4</sub> po modelu i na osnovu merenja iznosi 22.6%.

Razvijeni modeli mogu da se koriste za preciznu procenu emisija u svakoj sekundi, samo uz kalibrisanje nekim korekcionim faktorom koji će omogućiti bolje poklapanje sa trenutnim emisijama.

Predstavljeni modeli predstavljaju dobar konceptualni pristup za procenu ukupne emisije celog područja simuliranog mikrosimulacionim transportnim modelom. Procena je zasnovana na prosečnim vrednostima emisija ponovljenih merenja pa je i procena u vidu prosečnih emisija za simulirane uslove u saobraćajnom toku.

Modeli predstavljaju i dobru osnovu za dalji rad i razvoj korekcionih faktora kojima treba da se omogući precizna procena trenutne emisije vozila. U nastavku rada biće analizirani mogući korekcionni faktori i predložen onaj koji je dostupan iz postojeće baze podataka.

## **7 Izbor korekcionog faktora režimskog modela**

Kod izbora uticajnog faktora za korekciju modela osnova su hipoteze o vezama koje postoje na osnovu zabeleženih fizičkih odnosa. Eksperimentima u laboratorijskim uslovima (u literaturi) indikovani su ključni faktori osetljivosti emisija, kao što su opterećenja motora, broj obrtaja motora, temperatura gasa, dodatna oprema, itd.

Veliki je značaj kvantifikacije varijabilnosti i neizvesnosti u podacima. Postoji značajna varijabilnost u emisijama za određene kategorije mobilnih izvora kada je reč o izvorima na saobraćajnici. Pri modeliranju na makro nivou, interes za varijabilnost u emisijama među vozilima je manji, u odnosu na neizvesnosti u pogledu prosečne emisije voznog parka. Kod procena neizvesnosti prosečnih emisionih faktora koristi se statistička analiza podataka (Frey & Eichenberger 1997).

Prilikom procene emisija za pojedinačna vozila, važno je da se proceni preciznost podataka u smislu udela variranja podataka za vozila u okviru kategorije. Faktori koji će se koristiti za korekciju emisionog modela treba da se biraju tako da su izvedeni iz ključnih fizičkih promenljivih ali i da podaci mogu biti dostupni (Rouphail et al. 2001).

### **Korekcionni saobraćajni fizički faktori**

Kretanje vozila na uličnoj mreži je u funkciji od karakteristika saobraćajnog toka, fizičkih karakteristika saobraćajnice, karakteristika vozila i vozača. Mnoge geometrijske karakteristike saobraćajnica i njihov uticaj su predstavljeni u priručnicima kao što je HCM (Highway Capacity Manual).

Nagib saobraćajnice će značajno uticati na učestanost pojave različitih kombinacija brzina-ubrzanje koje opredeljuju pripadnost određenom režimu kretanja. Nagib saobraćajnice će uticati na dva činioca u sistemu modeliranja emisija: na prognozu aktivnosti u okviru režima (npr. manje brzine i ubrzanja na usponima) i na procenu emisija na nagibu (veće emisije na usponu). Ovo istraživanje svedeno je na deonice bez nagiba (ili sa malim nagibima). Snimanje pomoću GPS-a omogućava

prikupljanje podataka o nagibu saobraćajnice što se može iskoristiti u budućim istraživanjima. Podatak o nagibu je deo prikupljene baze podataka.

Na karakteristike promene brzine utiču i horizontalne krivine tako što postoji redukcija brzine kretanja u zavisnosti od radijusa. U gradskim uslovima često je reč o krivinama pod uglom od 90 stepeni. U istraživanju je odabrana mreža saobraćajnica koje su sa raskrscima uglavnom pod pravim uglom.

Na brzinu kretanja utiče i kategorija saobraćajnice. Magistralne i primarne saobraćajnice su svrstane u kategoriju brzih saobraćajnica na kojima se vozila najčešće kreću sa malim brojem zaustavljanja i brzinama do 60 km/h. Radi pribavljanja podataka o emisijama pri malim i velikim brzinama (ispod 30 i preko 60 km/h) u trasu odabranu za vožnju uključene su i sekundarne saobraćajnice kao i segmenti gradskog autoputa. Kategorija saobraćajnice utiče i na strukturu saobraćajnog toka koji se na njoj pojavljuje. Veći procenat teretnih vozila je prisutan na saobraćajnicama višeg ranga što utiče na raspodelu brzina i ubrzanja koji se ostvaruju u toku. U okviru različitih kategorija saobraćajnica uključeni su još neki fizički elementi koji utiču na karakteristike promene brzine, a to su: broj traka, širina traka, širina krivine itd (Grant 1998).

#### Korekcionni saobraćajni eksploatacioni faktori

Tipovi vozila su svrstani u eksploatacione kontrolne faktore jer tip vozila može imati veliki uticaj na raspodelu kombinacija brzina i ubrzanja u kojima se vozilo nalazi u toku vožnje. Zato se obično čitavi vozni parkovi dele u klase vozila na osnovu zajedničkih karakteristika (kao što su tip motora, zapremina tehnologija...). Istraživanje u ovoj disertaciji sprovedeno je samo na jednom vozilu (pre ECE kategorija), a u budućim istraživanjima za definisanje emisionih faktora celog voznog parka Beograda ili Srbije potrebno je proširiti istraživanje vozila koja pripadaju drugim kategorijama vozila.

Struktura saobraćajnog toka je slučajna promenljiva koja zavisi od trenutne situacije na terenu. Precizna prognoza strukture nije moguća bez prethodnog prikupljanja podataka na terenu. Na svakom nivou modeliranja mogu se primeniti različite metode za utvrđivanje strukture toka. Na mikro nivou mikro-simulacioni

modeli kalibrisani na brojanja saobraćaja i vremena putovanja mogu biti dobar osnov za procenu strukture saobraćajnog toka. Kalibrisani makro ili mezo modeli su dobra osnova za procenu strukture saobraćajnog toka na nivou celih gradova i na nivou dužih vremenskih perioda (čas). A na nivou regiona ili države podaci o aktivnosti određenih kategorija vozila su izvor podataka o strukturi saobraćajnog toka.

Nivo usluge (NU) je važan eksploatacioni pokazatelj. Velike brzine se ne mogu postići u uslovima zagušenja i na taj način se povećava broj ubrzanja i usporenja. Protok može biti bolji prognozni faktor u odnosu na nivo usluge, pošto je NU procena zasnovana na pokazateljima kojima se procenjuje frekvencija. Dok je rezultat transportnih modela protok po deonicama. Relacija brzina-protok oslikava dve važne karakteristike; da postoji opseg protoka u kom je brzina neosetljiva na promene protoka; i da sa približavanjem protoka kapacitetu brzina opada i postaje neizvesna njena promena u odnosu na protok. (Grant 1998).

#### Korekcionni faktori rada motora

Pokazatelji rada motora imaju veliki uticaj na nivoe emisije. Stepenn prenosa, broj obrtaja motora, temperatura i brzina izduvnog gasa, temperaturni gubici su samo neki od uticajnih faktora koji se mogu koristiti u modeliranju.

Merenja su pokazala da vozila sa katalizatorom imaju potpuno drugačije emisione karakteristike u odnosu na starija vozila. Polovina njihove emisije je u vezi sa kratkotrajnim epizodama emisije. Ove epizode se pojavljuju u trenucima promene stepena prenosa i intervalima u kojima se koristi velika snaga za pokretanje vozila ali se često dešavaju i bez posebnog razloga (de Haan & Keller 2000). Dobar pokazatelj promene stepena prenosa može da bude brzina izduvnog gasa, s obzirom da pri svakoj promeni stepena prenosa dolazi do njegove promene. U vezi sa stepenom prenosa i brzinom izduvnog gasa je i broj obrtaja motora. Broj obrtaja motora je korišćen pri razvoju mnogih emisioh modela kao jedan od važnijih faktora koji utiču na emisiju (Frey et al. 2001b; Barth, An, et al. 2000).

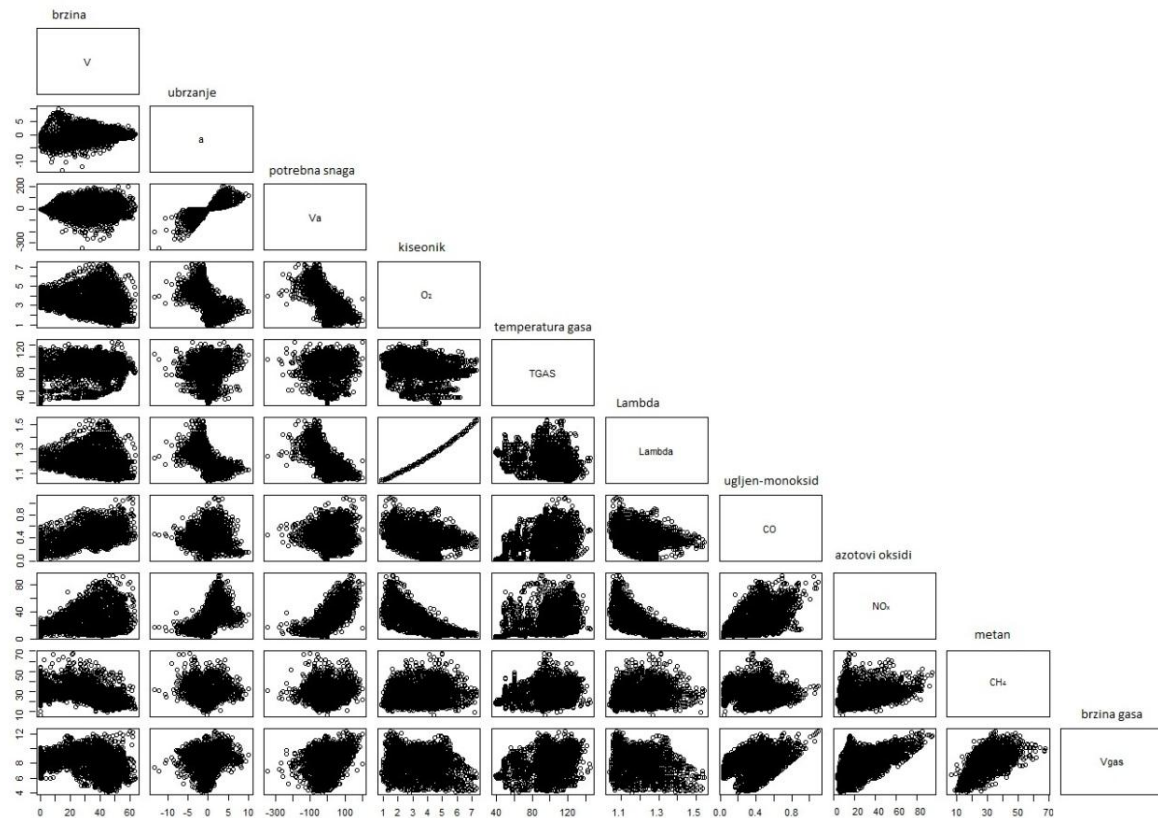
### Ostali korekcionni faktori

Vremenske prilike predstavljaju faktor koji može imati uticaj pri sprovođenju eksperimenata za prikupljanje podataka o emisijama. Kiša ili magla mogu uticati na razlike u načinu vožnje. Vremenska raspodela prikupljenih podataka može biti pod kontrolom. Radi se o odabiru radnih ili neradnih dana kao i vremena u toku dana kada se istraživanja obavljaju. Svi pokazatelji vremenskih prilika mogu se koristiti kao korekcionni faktori: temperatura vazduha, vlažnost vazduha, pritisak i sl.

Ponašanje (karakteristike) vozača mogu uticati na pojavu grešaka u analizi i ne može se kontrolisati. Odabir vozača može uticati na ishod istraživanja. U ovom radu je korišćen umereni način vožnje zbog želje da se prikupe podaci o uobičajenim karakteristikama promene brzine. Zato se u analizi orijentisalo na opseg brzina do 80km/h i umerene vrednosti ubrzanja (bez ekstremno velikih vrednosti ubrzanja i usporenja).

Opšti pristup modeliranju uključuje sledeća ključna pitanja (C. Frey et al. 2002) u vezi sa vizualizacijom podataka. Prvi korak vizuelizacije podataka obično uključuje razvijanje višestrukih uparenih tačkastih dijagrama (multiple pairwise scatter plots) na kandidatima za ulazne i izlazne varijable da bi se došlo do empirijskih veza među njima. Vizuelizacija podataka omogućava uvid u varijabilnost u podacima koja se ne može objasniti nekom od ulaznih promenljivih.

Za utvrđivanje korelacije između promenljivih pogodan je softver R (Prilog 4). Na osnovu grafičkih prikaza tzv. tačkastim ili rasutim (Scatter) dijagramima, moguće je paralelno prikazati više promenljivih i njihove međusobne odnose (Slika 7-1).

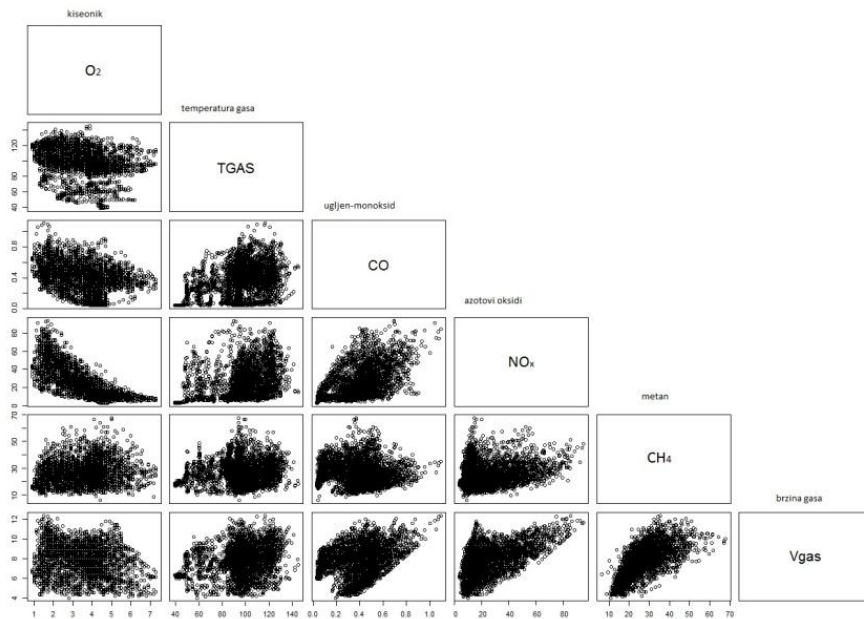


Slika 7-1. Rasuti dijagram međusobne zavisnosti svih snimljenih podataka

Na slici su prikazani odnosi svih elemenata baze podataka koji dolaze u obzir da budu korekcionni faktor emisija. Vidljivo je postojanje zavisnosti između brzine (V u prvoj koloni) i osnovnih zagađivača (CO, NO<sub>x</sub> i CH<sub>4</sub>). U slučaju CO i NO<sub>x</sub> sa porastom brzine raste i emisija, dok za CH<sub>4</sub> emisija opada. Vidljivo je i postojanje korelacije između snage (Va u trećoj koloni) i emisije pre svega NO<sub>x</sub>. Time su samo potvrđene tvrdnje iz literature da su brzina i potrebna snaga promenljive koje se mogu koristiti za modeliranje emisija zagađivača poreklom od saobraćaja.

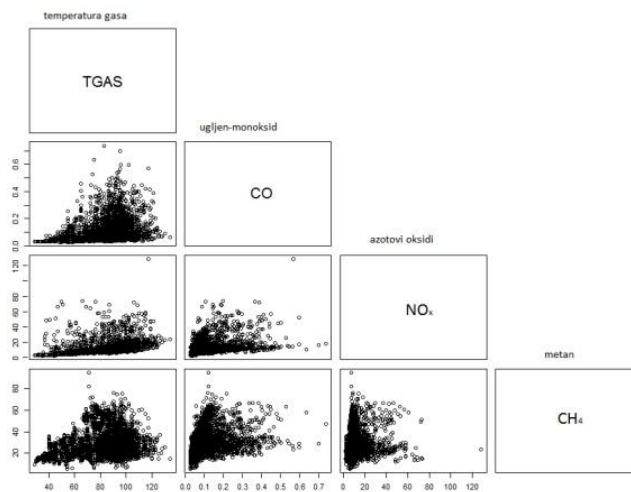
Iz grafika se vidi i postojanje korelacije između emisije O<sub>2</sub>, temperature izduvnog gasa i brzine izduvnog gasa sa emisijama osnovnih zagađivača. Na sledećoj slici biće prikazan detalj navedenih zavisnosti (Slika 7-2).





Slika 7-2. Detalj – Rasuti dijagram za O<sub>2</sub>, temperaturu gasa (TGAS), CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> i brzinu gasa (Vgas)

Da bi se proverilo postojanje zavisnosti prikazan je i rasuti dijagram za uslove mirovanja (Slika 7-3)



Slika 7-3. Detalj – Rasuti dijagram zavisnosti temperature gasa (TGAS), CO, NO<sub>x</sub> i CH<sub>4</sub> u stanju mirovanja

U koloni TGAS se vidi uticaj temperature izduvnog gasa na emisiju u mirovanju, pre svega u odnosu na NO<sub>x</sub>, koja sa povećanom temperaturom raste. Isti slučaj je i sa CO ali u malo blažem obliku i sa drugom raspodelom. Kod CH<sub>4</sub> se bar naočigled potvrđuje da nema značajnog uticaja temperature izduvnog gasa na emisiju.

## **7.1 Emisije u zavisnosti od temperature izduvnog gasa**

U razvoju korekcionih faktora se vodilo računa o mogućnostima korišćenja određenih pokazatelja. Nema smisla koristiti pokazatelje koji su rezultat neke kalkulacije kao što je slučaj sa podacima o temperaturnim gubicima, koeficijentom  $\lambda$ , CO<sub>2</sub> i efikasnosti sagorevanja. Pored toga nema smisla koristiti ni brzinu izduvnog gasa jer je ona već prethodno ugrađena u proračun emisije i konverziju iz mg/m<sup>3</sup> u g/s. Korišćenje ovog pokazatelja za korekciju emisija izaziva očekivanu korelaciju. Korišćenje O<sub>2</sub> za korekciju emisija je pogodno s obzirom na jake korelativne veze koje postoje sa emisijama osnovnih zagađivača. Ipak koncentracija O<sub>2</sub> nije podatak do koga je lako doći, odnosno on bi zahtevao priključivanje i ponovno merenje. S obzirom da je jedan od kriterijuma, korišćenje lako dostupnih podataka za analizu mogućnosti korišćenja korekcionog faktora je odabrana temperatura izduvnog gasa.

U narednom tekstu biće predstavljene zavisnosti emisija osnovnih zagađivača u odnosu na temperaturu izduvnog gasa. Zbog velikog broja podataka nije moguće na jednom dijagramu razmatrati navedene zavisnosti. Zato su oblasti brzina i potrebnih snaga klasirani (4 klase brzina i po tri klase u režimima ubrzanja i usoporenja) i kao pomoćna promenljiva za formiranje klasa dodata je brzina gasa (4 klase za svaku klasu potrebnih snaga).

Cilj ove analize je da se utvrdi mogućnost korišćenja temperature gasa za korekciju modela srednjih emisija formiranjem niza regresionih zavisnosti u definisanim klasama. Ispitan uticaj temperature izduvnog gasa na varijabilnost emisija. Podaci o korelacijama su prikazani u priložima (Prilozi 11 do 14). Šema proizvedenih rasutih dijagrama je data u tabeli .

Tabela 7-1. Šema rasutih dijagrama prikazanih u prilogu

V / Va	-100/-65	-65/-25	-25/0	0/25	25/65	65/100
0 - 1	11T6	12T6	13T6	14T6	15T6	16T6
	11T10	12T10	13T10	14T10	15T10	16T10
	11T15	12T15	13T15	14T15	15T15	16T15
1 - 30	21T6	22T6	23T6	24T6	25T6	26T6
	21T10	22T10	23T10	24T10	25T10	26T10
	21T15	22T15	23T15	24T15	25T15	26T15
30 - 50	31T6	32T6	33T6	34T6	35T6	36T6
	31T10	32T10	33T10	34T10	35T10	36T10
	31T15	32T15	33T15	34T15	35T15	36T15
>50	41T6	42T6	43T6	44T6	45T6	46T6
	41T10	42T10	43T10	44T10	45T10	46T10
	41T15	42T15	43T15	44T15	45T15	46T15

U redovima tabele su klasirane brzine kretanja na 4 klase brzina. To su klase mirovanja (0 do 1 km/h), 1 do 30 km/h, 30 do 50 km/h i preko 50 km/h. U kolonama tabele se nalaze klase potrebnih snaga, od 0 do 25, 25 do 65 i 65 do 100  $\text{km}^2/\text{h}^2/\text{s}$ . Klase potrebnih snaga su dodatno podeljene na 4 klase brzine izduvnog gasa da bi se smanjio broj podataka po klasi. Klase brzina gasa su u rasponima od: 3.5 do 6, 6 do 9, 9 do 12 i veće od 12.

Ovako klasirani podaci su prikazani u prilogima 11 do 14 i služe osnova za utvrđivanje korekcionih faktora za utvrđivanje realnih trenutnih emisija. Prikazana je zavisnost promene emisije CO od promene temperature za ubrzanja, odnosno snage veće od 0 (Prilog 14) i usporenja, snage manje od 0 (Prilog 13). Prikazana je i zavisnost promene emisije  $\text{NO}_x$  od promene temperature za ubrzanja (Prilog 16) i usporenja (Prilog 15). Za  $\text{CH}_4$  nisu prikazane zavisnosti pošto je utvrđeno da nema korelacije između temperature gasa i emisije  $\text{CH}_4$ . Temperatura gasa je odabrana kao korekcionni faktor koji će biti korišćen u budućim istraživanjima. U ovoj disertaciji nije razvijan model za procenu realnih trenutnih emisija na osnovu mikroskopskih transportnih modela.

U ovom delu rada praktično je predstavljena metodologija korišćenja podataka o emisijama vozila u pokretu kao osnove za odabir korekcionog faktora emisija u procesu formiranja preciznog modela za procenu trenutnih emisija. Podrazumeva

se ista metodologije za: ugljen-monoksida (CO), azotnih oksida (NO<sub>x</sub>) i metana (CH<sub>4</sub>). Odabir je ograničen na podatke prikupljene u toku istraživanja korišćenjem uređaja za merenje emisija koji je formiran kao deo ove disertacije. Jedna od Hipoteza disertacije je bila razvoj i demonstracija metodologije za analizu podataka o emisijama vozila u pokretu gde je prvi deo definisanje svih metoda u različitim koracima metodologije, a drugi primena metodologije na prikupljenim podacima, što je u ovom segment i urađeno.

## **8 Zaključak i pravci budućeg istraživanja**

### **8.1 Zaključak**

Procena emisija na osnovu režimskih modela zasnovana je na postojanju preciznih ulaznih podataka o karakteristikama promene uslova u saobraćajnom toku (odnosno promeni brzine u svakom trenutku). Promene brzine u saobraćajnom toku su najčešće posledica uslova u saobraćajnom toku odnosno ineterakcije brzine, gustine i protoka. Na uličnoj mreži važan je uticaj upravljanja saobraćajem preko efekata koordinisanog rad signala, adaptibilanog rada signala i drugih upravljačkih mera. Emisioni modeli mogu se smatrati kao alat koji omogućava proračun emisija štetnih gasova na osnovu podataka o saobraćaju na mreži koji su dobijeni iz transportnih modela. Mikro simulacioni transportni modeli su jedan od potencijalnih izvora podataka neophodnih za procenu pomoću emisionih modela.

Transportni modeli uvek podležu nekoj vrsti kalibracije za šta su potrebna merenja stvarnih brzina na saobraćajnoj mreži. Manjim brojem merenja na karakterističnim deonicama obezbeđuju se podaci za kalibrisanje modela koji zatim služi za procenu trenutnih emisija na celom području koje je obuhvaćeno modelom. Proračun emisija je direktan kada postoji kalibrisani transportni model i definisana veza između saobraćajnih pokazatelja i karakteristika emisija.

Emisioni modeli su generalno većeg nivoa preciznosti, odnosno mogu zahtevati veći broj podataka od onog koji transportni model uobičajeno generiše (npr. odgovarajuće učešće različitih tipova vozila u saobraćajnom toku). To su karakteristike koje se mogu nadoknaditi upotrebom podataka iz statistike, pa i pored toga važi da su:

1. Transportni modeli dobra osnova za nadogradnju emisionim modelima i da u kombinaciji omogućavaju procenu emisije na svim nivoima.
2. Povezivanje saobraćajnih, emisionih modela i merenja načina vožnje omogućava procenu uticaja saobraćaja na zagađenje vazduha urbanih i ruralnih sredina (u zavisnosti od prostornog domena modela). Modelska procena emisija je dovoljna za strateško i operativno planiranje saobraćaja i upravljanje saobraćajnim tokovima.

Rezultati modelske procene emisija su osnova za unapređenje pristupa u planiranju saobraćaja koji se pomera ka održivom planiranju. Procena uticaja saobraćajnih rešenja na životnu sredinu je jedna od tri osnovne komponente održivosti. Potencijal modelskog pristupa u rešavanju problema je u mogućnosti testiranja velikog broja varijanti saobraćajnih rešenja i kvantifikovanje njihovog pojedinačnog uticaja na životnu sredinu. Prethodna upotreba modela razvijenih za druga područja (gradove ili države) omogućavala je samo relativno poređenje varijanti dok bi razvijanje modela specifičnog za lokalne uslove omogućilo i apsolutnu kvantifikaciju emisije.

3. Povezivanje transportnih i emisionih modela omogućava vrednovanje saobraćajnih rešenja zasnovano na principima održivosti i kvantifikovanju uticaja na životnu sredinu.

Validacijom modela u kome figurira trenutna brzina dokazana je hipoteza o vezi transportnih i emisionih modela koja omogućava procenu uticaja saobraćaja na zagađenje vazduha urbanih sredina. Osnovne razlike u tretmanu brzina upravo određuju različite tipove transportnih modela. Makroskopski modeli daju podatke o prosečnim brzinama u vremenskim periodima od jednog sata i to su statički modeli. Mezoskopski modeli daju brzine kretanja (takođe prosečne) uzimajući u obzir kraće vremenske intervale (npr. petominutne). To su modeli koji delimično uzimaju u obzir dinamičke karakteristike saobraćaja. Mikroskopski modeli daju brzine u svakoj sekundi i to su dinamički modeli.

4. Formiranjem režimskog emisionog modela prosečnih vrednosti u disertaciji, koji kao ulaz koristi samo podatke o načinu vožnje u svakoj sekundi, dokazana je, i za konkretan slučaj matematičkim jednačinama opisana veza sa mikro simulacionim transportnim modelom. Generisanje emisionih faktora je zasnovano na ciklusima vožnje. Podaci prikupljeni na nivou svake sekunde su pogodni za simuliranje bilo kog ciklusa vožnje.

Za razvoj režimskog emisionog modela su korišćeni kalibrisani podaci o prosečnim izmerenim vrednostima emisija. Podaci o emisijama su agregirani na nivou klasa. Agregiranje je dobar pristup pošto se radi sa velikim brojem podataka (u ovom slučaju oko 50000). Klasiranje brzina i potrebnih snaga dobijen je veći broj

podataka za svaku njihovu kombinaciju. Širina klase utiče na preciznost podataka što je u radu definisano standardnim odstupanjem srednjih vrednosti. Standardna odstupanja po klasama su pokazatelj (ne)preciznost samog modela. Veća preciznost prognoze zahtevala bi podelu na veći broj klasa i veću količinu ulaznih podataka. Za potrebe ovog rada procenjeno je da je definisana preciznost dovoljna za razvoj modela.

Razvijen je režimski model. U okviru ovog tipa modela posebno se modeliraju zavisnosti u različitim režimima (modovima): ubrzanju, usporenju, praznom hodu (mirovanju) i ravnomernoj vožnji. U modeli su na jednostavan način odvojeni režimi rada sa specifičnim karakteristikama emisija. Režimi su definisani na osnovu odnosa brzine i ubrzanja. Modeli ubrzanja i usporenja su dvodimenzionalni modeli polinoma četvrtog stepena predstavljen jednačinom površi. Model ravnomernog kretanja zavisi samo od brzine i predstavljen je jednačinom krive polinoma trećeg stepena. Dok je emisija u praznom hodu prosečna vrednost svih merenja u tom režimu.

Model je zasnovan na emisionoj mapi, odnosno dvodimenzionalnoj matrici gde su na osama brzine i potrebne snage, a u poljima matrice srednje vrednosti emisija. Tako definisana matrica je služila za definisanje modela u svim režimima.

Kalibracija modela je izvršena podelom modova ubrzanja i usporenja na manje površine koje obuhvataju nekoliko klasa brzina. Na taj način je ostvareno poboljšanje preciznosti modela, poboljšanjem statističkih pokazatelja greške. Nedostaci se javljaju kod ekstremnih vrednosti koje nisu dobro pokrivene izmerenim vrednostima. Model tada ima ekstremne vrednosti koje nije moguće zanemariti.

Validacija modela vršena je na nezavisnom skupu podataka koji nije korišćen u razvoju modela. To su dve vožnje sa oko 7000 podataka, što je oko 15% od podataka koji su korišćeni za razvoj modela. Validacija je izvršena na nivou celih putovanja i ukupne emisije za putovanje i ceo uzorak. Dobijene vrednosti poklapanja su između 82 i 85% sa karakterističnim precenjivanjem vrednosti u modelu. Razlika je podudarna sa prekoračenjima koja su zabeležena prilikom kalibracije podataka merenja.

5. Na nivou procene srednjih vrednosti emisija dovoljan nivo preciznosti se ostvaruje definisanjem jedinstvene jednačine ubrzanja i usporenja za cele modove. Tako su izbegnute ekstremne vrednosti emisija koje se javljaju kao greška modela i zahtevaju dodatno kalibrisanje modela. Model razvijen na nivou srednjih vrednosti nije u mogućnosti da predvidi ni da se upotrebljava za precizno definisanje emisija za svaku sekundu kretanja. Za takvu mogućnost neophodna je dodatna kalibracija uticajnim faktorima koja će biti predmet budućeg istraživanja.

U disertaciji su definisane i hipoteze koje su obuhvatale oblasti razvoja efikasne i ekonomske metodologije za prikupljanje podataka o emisijama vozila i veze između transportnih i emisionih modela.

Hipotezom je definisana mogućnost formiranja ekonomske merne metodologije koja će omogućiti formiranje baze podataka o emisijama vozila u realnim uslovima u saobraćajnom toku kao osnova za precizno određivanje emisija vozila u saobraćajnom toku u urbanim područjima. Ova hipoteza je dokazana kroz nekoliko koraka. U radu je prikazan način na koji je napravljena veza između GPS uređaja za snimanje načina vožnje, mernog uređaja kojim se beleže trenutne emisije i sistema za napajanje koji omogućava rad uređaja pri merenju u vozilu koje se kreće.

Da bi baza podataka bila upotrebljiva na svim nivoima modelovanja emisija (makro, mezo i mikro) rešen je i problem konverzije emisija iz uobičajenih mernih jedinica, ppm (čestica na milion čestica vazduha) u jedinice koje definišu količinu emitovane štetne materije. U tu svrhu je pored sonde za prikupljanje gasa instalirana i Pitova cev. Na taj način se u svakom trenutku beleži količina emitovanog gasa. Primenom jednostavne formule emisije se konvertuju u g/s ili mg/s.

Na taj način je testirana merna instalacija pomoću koje se formira baza podataka o trenutnim emisijama vozila u pokretu koja predstavlja vezu između karakteristika promene brzine i parametara emisije (izražene u količini emitovane materije u svakoj sekundi).



Formirana merna instalacija je efikasna i ekonomična. Na taj način prikupljaju se podaci o: trenutnoj lokaciji vozila na kome se vrše istraživanja (latituda, longituda i altituda); karakteristikama vožnje (trenutna brzina, ubrzanje i potrebna snaga); karakteristike emisija (trenutne emisije CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>...); količini emitovanog gasa.

6. Merna instalacija omogućava efikasno prikupljanje osnovnih podataka potrebnih za modeliranje uticaja parametara saobraćajnog toka (pre svega brzine) na promenu emisije vozila. Jedan od rezultata je pobijanje tvrdnje da je prikupljanje baze podataka o emisijama u svakoj sekundi veoma skupo i zahtevno. Prikazani rezultati disertacije omogućavaju jednostavniji pristup ovim podacima, što treba da omogući napredak istraživanja zakonitosti između emisija, uslova u saobraćajnom toku i uslova rada vozila u svakoj sekundi.

Metodološki pristup je moguće obogatiti integrisanjem drugih uređaja za prikupljanje podataka kao što su uređaji za merenje potrošnje goriva ili obrtaja motora. Formiranje baze podataka je izvedeno na vozilu sa najnižim emisionim standardom (pre ECE, bez katalizatora) da bi se testirala metodologija prikupljanja podataka na najsloženijem slučaju. Kod modernijih vozila do preciznijih podataka o kretanju vozila i radu motora moguće je doći i povezivanjem sa on-board kompjuterom. Delovi prezentovane metodologije istraživanja su dobra osnova za nadogradnju baze podataka i njeno proširenje drugim uticajnim faktorima u dinamičkom sistemu kakav je vozilo u pokretu.

7. Metodologija istraživanja je integrabilna, odnosno omogućava jednostavno proširenje baze podataka koja se prikuplja. Pored toga metodologija se može koristiti i u izvornom obliku jer omogućava prikupljanje podataka u uslovima koji nisu obuhvaćeni ovom disertacijom (npr. emisije na nagibima). Metodologija otvara velike mogućnosti i nove pravce budućih istraživanja.

Usled nedostataka uređaja za merenje emisija koji su posledica karakteristika senzora u bazi podataka su zabeležena kašnjenja u registrovanju emisija. Izražena dinamika procesa emisije je okarakterisana promenama u količinama emitovanog

gasa kao posledice uslova rada motora i izduvnog sistema. S druge strane, karakteristike merne instalacije koja se sastoji od linije za uzorkovanje i senzora unose dodatnu dinamičku komponentu u rezultujuće trenutne emisije. Sve zajedno, emisija tokom prolaska kroz sistem koji čine izduvna cev, linija za uzorkovanje gasa i senzor ima dinamičko kašnjenje. To znači da kašnjenje nije uvek jednako, već zavisi od čitavog niza faktora.

U radu je korišćena teorija kontrolnih sistema da bi se poništio uticaj kašnjenja signala emisije pri prolasku kroz merni sistem. Sistem je podeljen na dve komponente, statičku i dinamičku. Na taj način je odvojena statička (fiksna) komponenta i dinamička komponenta kašnjenja. Statička komponenta je određena vizuelno pregledom signala brzine i emisije. Dinamička komponenta je analizirana i definisana funkcijom prenosa koja opisuje način promene izlaznog signala u odnosu na ulazni. Ulazni signal je u ovom slučaju emisija na kraju izduvne cevi, a izlazni signal registrovan na mernom sistemu.

Sistem je simuliran upotrebom Simulink alata u okviru Matlab-a. Kalibrisanje modela sistema prenosa emisije je rađeno vizuelno na osnovu oblika signala. Validacija je izvršena na nivou ukupno zabeležene emisije u toku pojedinačnih vožnji i celog uzorka (svih 14 vožnji).

8. Primena teorije kontrolnih sistema omogućava poništavanje efekata kašnjenja koji su posledica odziva mernog sistema. U disertaciji je razvijen sopstveni pristup za kalibraciju podataka dobijenih snimanjem na osnovu razvijene merne instalacije. Rezultati kalibracije su validirani na osnovu ukupnih emisija u toku pojedinačne vožnje i na celom uzorku. Odstupanje vrednosti dobijenih merenjem i korigovanih vrednosti je prosečno na nivou vožnje i ukupno %.

## **8.2 Pravci budućih istraživanja**

Doprinos doktorske teze treba u budućem periodu iskoristiti za formiranje sveobuhvatne baze podataka o emisijama koja treba da izraste u skup emisionih modela kojima će se opisivati emisione karakteristike voznog parka Srbije. Transportni modeli (nacionalni i gradski) i baza podataka o emisijama vozila treba

da budu upotrebljeni kao osnova u ekološkom vrednovanju i procesu odlučivanja sa ekološkog aspekta, pa će se u daljem radu težiti praktičnoj upotrebi podataka i modela. Na taj način će se unaprediti planerska praksa kroz unapređenja u:

- procedurama planiranja saobraćaja,
- okretanju ka održivom planiranju,
- kvantitetu i kvalitetu baza podataka o saobraćaju i emisijama i
- mogućnostima vrednovanja saobraćajnih rešenja iz ugla uticaja na životnu sredinu.

Metodologije istraživanja i modeliranja treba da služe kao osnova za procenu emisija, odnosno formiranje modela na svim nivoima procene: makro, mezo i mikro. Buduće aktivnosti će biti usmerene ka formiranju što je moguće preciznijih modela za procenu emisija.

Po pitanju merna instalacije potrebno je testirati, u zavisnosti od mogućnosti, primenu mernih uređaja koji imaju sposobnost bržeg reagovanja na promene emisija. Baza podataka zahteva stalno unapređivanje što znači dodavanje novih podataka. Pre svega težiće se dodavanju podataka o stepenu prenosa, broju obrtaja motora kao i potrošnje goriva.

Za procenu na makro i mezo nivou potrebno je utvrditi merodavne cikluse vožnje na osnovu kojih će se definisati emisije na osnovu prosečnih brzina kretanja.

Prostorna raspodela emisija je u domenu budućih istraživanja i može se koristiti za procenu emisija saobraćajnih deonica različitih funkcionalnih kategorija. Cilj će biti ocena uticaja određenih kategorija saobraćajnica na emisiju. Pored toga, istraživaće se uticaj faktora, kao što su nagib saobraćajnice, mere za kontrolu i upravljanje saobraćajem i dr.

Za potrebe procene emisija na svim nivoima procene potrebno je istražiti emisione karakteristike vozila koja čine vozni park Srbije. Kategorije vozila koje čine vozni park će zavisiti od vrste goriva, zapremine motora i emisionog standarda (EURO). Dalja opsežnija istraživanja treba da dovedu do stvaranja robusne baze podataka o emisijama karakterističnih kategorija vozila u svakoj sekundi. Na taj način se obezbeđuje mogućnost prilagođavanja podataka prema svim nivoima procene.

---

## 9 Literatura

- Ahn, K. et al., 2002. Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), pp.182–190.
- Ahn, K., 1998. *Microscopic fuel consumption and emission modeling*.
- Ahrens, B., 2003. Rainfall downscaling in an alpine watershed applying a multiresolution approach. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 108(D8), pp.8388–8399.
- Ajtay, D. & Weilenmann, M., 2004. Compensation of the exhaust gas transport dynamics for accurate instantaneous emission measurements. *Environmental science & technology*, 38(19), pp.5141–8.
- Ajtay, D., Weilenmann, M. & Soltic, P., 2005. Towards accurate instantaneous emission models. *Atmospheric Environment*, 39(13), pp.2443–2449.
- Allen, J., Thorne, G. & Browne, M., 2006. *Good Practice Guide on Urban Freight Transport*, NL.
- An, F. et al., 1997. Development of Comprehensive Modal Emissions Model Operating Under Hot-Stabilized Conditions. *Transportation Research Record*, 1587(970706), pp.52–62.
- Andre, M., 2004a. *Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles*,
- Andre, M., 2006. *Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part B: Driving cycles according to vehicle power*,
- Andre, M., 2004b. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of The Total Environment*, 334-335, pp.73–84.

- Barceló, J. et al., 2005. Methodological Notes on Combining Macro, Meso and Micro Models for Transportation Analysis. In *Proceedings of the 13th World Conference on ITS*. pp. 1–40.
- Barlow, T., Boulter, P. & McCrae, I., 2007a. *A review of instantaneous emission models for road vehicles*, UK.
- Barlow, T., Boulter, P. & McCrae, I., 2007b. *An evaluation of instantaneous emission models*, UK.
- Barlow, T., Boulter, P. & McCrae, I., 2007c. *Scoping study on the potential for instantaneous emission modelling : summary report*, UK.
- Barth, M., Younglove, T., et al., 2000. *Development of a Comprehensive Modal Emissions Model*, US.
- Barth, M., An, F., et al., 2000. *Development of a Comprehensive Modal Emissions Model*, US.
- Barth, M., An, F. & Norbeck, J., 1996. Modal Emissions Modeling: A Physical Approach. *Transportation Research Record*, 1520(1996), pp.81–88.
- Basaric, V. et al., Efficient methodology for assessment of targets and policy measures for sustainable mobility systems. *International Journal of Sustainable Transportation*, p.25.
- Bishop, G. & Stedman, D., 2008. A decade of on-road emissions measurements. *Environmental science & technology*, 42(5), pp.1651–6.
- Den Braven, K., Abdel-rahim, A. & Battles, A., 2012. *Modeling Vehicle Fuel Consumption and Emissions at Signalized Intersection Approaches : Integrating Field-Collected Data Into Microscopic Simulation*,
- Cernuschi, S. et al., 1995. Modal analysis of vehicle emission factors *Facteur.* , 169, pp.175–183.

- Coelho, M., Farias, T. & Roupail, N., 2009. A Numerical Tool for Estimating Pollutant Emissions and Vehicles Performance in Traffic Interruptions on Urban Corridors. *International Journal of Sustainable Transportation*, 3(4), pp.246–262.
- Coelho, M., Farias, T. & Roupail, N., 2005. Impact of speed control traffic signals on pollutant emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(4), pp.323–340.
- Coelho, M.C., Farias, T.L. & Roupail, N.M., 2009. A Numerical Tool for Estimating Pollutant Emissions and Vehicles Performance in Traffic Interruptions on Urban Corridors. *International Journal of Sustainable Transportation*, 3(4), pp.246–262.
- De Coensel, B. et al., 2012. Effects of traffic signal coordination on noise and air pollutant emissions. *Environmental Modelling & Software*, 35, pp.74–83.
- Colberg, C. et al., 2005. Comparison of a road traffic emission model (HBEFA) with emissions derived from measurements in the Gubrist road tunnel, Switzerland. *Atmospheric Environment*, 39(26), pp.4703–4714.
- Costabile, F. & Allegrini, I., 2008. A new approach to link transport emissions and air quality: An intelligent transport system based on the control of traffic air pollution. *Environmental Modelling & Software*, 23(3), pp.258–267.
- Depolo, V., 2006. *Indukovana izgradnja i investicije u saobraćaju*, Beograd: Saobraćajni Fakultet i Direkcija za građevinsko zemljište i izgradnju grada.
- DfT, 2007. *Design Manual for Roads and Bridges - Environmental Assessment Techniques*, UK.
- DfT, 1997. *Design Manual for Roads and Bridges - Traffic Appraisal of Road Schemes 12(1)*, UK.

DfT, 1996. *Design Manual for Roads and Bridges - Traffic Appraisal of Road Schemes 12(2)*, UK.

Djordjevic, D., Mihajlidi-Zelic, A. & Relic, D., 2005. Differentiation of the contribution of local resuspension from that of regional and remote sources on trace elements content in the atmospheric aerosol in the Mediterranean area. *Atmospheric Environment*, 39(34), pp.6271–6281.

Djordjevic, D. & Solevic, T., 2008. The contributions of high- and low altitude emission sources to the near ground concentrations of air pollutants. *Atmospheric Research*, 87(2), pp.170–182.

Dravitzki, V. & Brown, D., 1998. On-Board Vehicle Emission Measurement Technique for the Determination Effect of Route Attributes on Emission Rates. In *19th Arrb Transport Research Ltd Conference*. pp. 36–50.

EC, 2011. *Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system*, EU.

EEA, 2006. *Air pollution at street level in European cities*, DK.

EEA, 2011. *Air quality in Europe — 2011 report*, DK.

EEA, 2012a. *Air quality in Europe — 2012 report*, DK.

EEA, 2012b. *European Union emission inventory report 1990–2010 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)*, DK.

EEA, 2012c. *The contribution of transport to air quality*,

Fenger, J., 1999. *Urban Air Pollution : European Aspects*, Springer.

FHA, 1996. *Quick Response Freight Manual*, US.

Filipović, D., 2000. *Geoprostorno modelovanje rizika u životnoj sredini*. Geografski Fakultet.

- Frey, C. et al., 2001a. *Emissions Reduction Through Better Traffic Management: An Empirical Evaluation Based Upon On-Road Measurements*, US.
- Frey, C. et al., 2001b. Measurement of On-Road Tailpipe CO, NO, and Hydrocarbon Emissions Using a Portable Instrument. In *Annual Meeting of the Air & Waste Management Association*. pp. 1–20.
- Frey, C., Unal, A., Chen, J., et al., 2003. Modeling Mobile Source Emissions Based Upon In-Use and Second-by-Second Data: Development of Conceptual Approaches for EPA ' s New MOVES Model. In *Annual Meeting of the Air & Waste Management Association*. pp. 1–20.
- Frey, C., Unal, A., Roupail, N., et al., 2003. On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 53(8), pp.992–1002.
- Frey, C. & Eichenberger, D., 1997. *Remote Sensing of Mobile Source Air Pollutant Emissions : Variability and Uncertainty in On-Road Emissions Estimates of Carbon Monoxide and Hydrocarbons for School and Transit Buses*, US.
- Frey, C. & Unal, A., 2002. Use of On-Board Tailpipe Emissions Measurements for Development of Mobile Source Emission Factors. , pp.1–13.
- Frey, C., Unal, A. & Chen, J., 2002. *Recommended Strategy for On-Board Emission Data Analysis and Collection for the New Generation Model*, US.
- Frey, C., Zhang, K. & Roupail, N., 2010. Vehicle-specific emissions modeling based upon on-road measurements. *Environmental science & technology*, 44(9), pp.3594–600.
- Grant, D., 1998. *Representative Vehicle Operating Mode Frequencies: Measurement and Prediction of Vehicle Specific Freeway Modal Activity*. Georgia Institute of Technology.



- Guo, H. et al., 2007. Evaluation of the International Vehicle Emission (IVE) model with on-road remote sensing measurements. *Journal of environmental sciences (China)*, 19(7), pp.818–26.
- De Haan, P. & Keller, M., 2000. Emission factors for passenger cars: application of instantaneous emission modeling. *Atmospheric Environment*, 34(27), pp.4629–4638.
- De Haan, P. & Keller, M., 2004. Modelling fuel consumption and pollutant emissions based on real-world driving patterns : the HBEFA approach. *Int. J. Environment and Pollution*, 22(3), pp.240–258.
- Harrington, W. & McConnell, V., 2003. *Motor Vehicles and the Environment*, US.
- Hassounah, M. & Miller, E., 1995. Modelling air pollution from road traffic: a review. *Traffic Engineering + Control*, 35(9), pp.510–514.
- Hausberger, S. et al., 2009. *Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3*, Graz.
- Immers, L. & Stada, J., 1998. *Traffic Demand Modelling*, Leuven.
- INFRAS, 2004. *Handbook of Emission Factors for Road Transport, Version 2.1*, Berne.
- Institut saobraćajnog Fakulteta/ISF, 2010. *Određivanje količina emitovanih gasovitih zagađujućih materija poreklom od drumskog saobraćaja primenom COPERT 4 modela evropske agencije za životnu sredinu (Road Transport gas emissions using COPERT 4)*, Beograd.
- Int Panis, L., Broekx, S. & Liu, R., 2006. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *The Science of the total environment*, 371(1-3), pp.270–85.
- Interacademy Council/IAC, 2007. *Lighting the way Toward a sustainable energy future*, NL.

- Jiménez, J.L. et al., 1999. Vehicle Specific Power : A Useful Parameter for Remote Sensing and Emission Studies Effect of Driving Conditions on Emissions • Driving conditions may strongly influence emissions. In *9th CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop*. US, p. 26.
- Joumard, R. et al., 1995. Hot passenger car emissions modelling as a function of instantaneous speed and acceleration. *The Science of the total environment*, 169(95), pp.167–174.
- Joumard, R. et al., 2000. Influence of driving cycles on unit emissions from passenger cars. *Atmospheric Environment*, 34(27), pp.4621–4628.
- Joumard, R., 1999. *Methods of Estimation of Atmospheric Emissions from Transport: European scientist network and scientific state-of-the-art*, FR.
- Joumard, R., Philippe, F. & Vidon, R., 1999. Reliability of the current models of instantaneous pollutant emissions. *The Science of the total environment*, 235(1-3), pp.133–42.
- Jovanović, N., 1990. *Planiranje saobraćaja*, Beograd: Saobraćajni Fakultet.
- Jovic, J., 2004. Modern tool in transportation planning – Transport model of Belgrade. *Transporti Europei*, 24, pp.31–38.
- Jović, J., 1996. *Planiranje saobraćaja u gradovima*, Beograd: Saobraćajni Fakultet.
- Jović, J., 2007. *Transportni model Beograda*, Beograd.
- Jovic, J. & Djoric, V., 2009. Application of transport demand modeling in pollution estimation of a street network. *Thermal Science*, 13(3), pp.229–243.
- Jovic, J. & Djoric, V., 2010. Traffic and Environmental Street Network Modelling: Belgrade Case Study. *Transport*, 25(2), pp.155–162.
- Kallenrode, M.-B., 2006. *Modeling Transport*, Osnabruck.

- Kecman, I. et al., 2012. Serbian Road Transport and Ppllutant Emissions: An Indicator Based Review and Comparative Analysis. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 2(1), pp.70–82.
- Kenworthy, J.R. & Laube, F.B., 1999. Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(7-8), pp.691–723.
- Kishi, Y. et al., 1996. A method for estimating traffic flow fuel consumption - Using traffic simulations. *JSAE Review*, 17, pp.307–311.
- Kousoulidou, M. et al., 2010. *Validation and Improvement of CORINAIR's Emission Factors for Road Transport using Real-World Emissions Measurements*,
- Lawson, D. et al., 1990. Emissions of In-Use motor vehicle in Los Angeles: A pilot study of remote sensing and the inspection and maintenance program. *Journal of the Air and Waste Management association*, 40(8), pp.1096 – 1105.
- LeBlanc, D. et al., 1995. Driving Pattern Variability and Impacts on Vehicle Carbon Monoxide Emissions. *Transportation Research Record*, 1472, pp.45–52.
- Lei, W., Chen, H. & Lu, L., 2010. Microscopic Emission and Fuel Consumption Modeling for Light-duty Vehicles Using Portable Emission Measurement System Data. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 42, pp.904–911.
- Leung, C. & Williams, J., 2000. Modelling of motor vehicle fuel consumption and emissions using a power-based model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 65, pp.21–29.
- Litman, T., 2011. Sustainable Transportation and TDM. *TDM Encyclopedia*.
- Litman, T., 2013. *Well Measured - Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning*, US.

- Madireddy, M. et al., 2011. Assessment of the impact of speed limit reduction and traffic signal coordination on vehicle emissions using an integrated approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(7), pp.504–508.
- Matzoros, A., 1990. Results from a model of road traffic air pollution, featuring junction effects and vehicle operating. *Traffic Engineering + Control*, 31(1), pp.24–35.
- Morgan, M. & Henrion, M., 1990. *Uncertainty: A Guide to dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*, New York: Cambridge University Press.
- Negrenti, E. & Zanini, G., 1999. Combining macroscopic traffic data, average speed emissions and instantaneous emission factors: the kinematics congestion factor as an innovative tool for traffic policies assessment. In *ICE99 International Conference*. pp. 385–391.
- Nesamani, K.S. & Subramanian, K.P., 2006. Impact Of Real-World Driving Characteristics On Vehicular Emissions. *JSME International Journal Series B*, 49(1), pp.19–26.
- North, R., 2006. *Assessment of real-world pollutant emissions from a light-duty diesel vehicle*.
- NRC, 2000. *Modeling Mobile-Source Emissions*, Washington, D.C: National Academy Press.
- Ntziachristos, L. & Samaras, Z., 2000. *COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport*, EU.
- Ntziachristos, L. & Samaras, Z., 2010. *EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009*, EU.
- OECD, 2002. *Implementing Sustainable Urban Travel Policy*, EU.

- Ortuzar, J. de D. & Willumsen, L., 2011. *Modelling Transport* 4th editio., Wiley.
- Pelkmans, L. et al., 2005. Simulations of fuel consumption and emissions in typical traffic circumstances. *Air Pollution XV - Ecology and the Environment*, 101, p.10.
- Pimentel, M., 2008. *Transportation Modelling for Environmental Impact Assessment Porto Metropolitan Area Case Study*. University of Porto.
- Rakha, H., Ahn, K. & Trani, A., 2004. Development of VT-Micro Model for Estimating Hot Stabilized Light Duty Vehicle and Truck Emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 9(1), pp.49–74.
- Richardson, B., 1999. Towards A Policy On A Sustainable Transportation System. *Transportation Research Record*, 1670, pp.27–34.
- Ross, M., Goodwin, R. & Watkins, R., 1995. *Real-World Emissions from Model Year 1993 , 2000 , and 2010 Passenger Cars*, US.
- Rouphail, N. et al., 2001. Vehicle Emissions and Traffic Measures: Exploratory Analysis of Field Observations at Signalized Arterials. In *80th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington D.C., p. 27.
- Scora, G. & Barth, M., 2006. *Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM) User 's Guide*, US.
- Silva, C., Farias, T. & Mendes-Lopes, J., 2004. Cold Start, Part Warm Start and Warm Up Simulation of Vehicles in Ecogest. In *Proceedings of the 30th FISITA World Automotive Congress (FISITA 2004)*. Barcelona.
- Singer, B.C., 2000. Some Issues in the Statistical Analysis of Vehicle Emissions. *Journal of Transportation and Statistics*, 3(2), pp.1–14.
- Smit, R., 2006. *An Examination of Congestion in Road Traffic Emission Models and their Application to Urban Road Networks*. Griffith University.

- Smit, R., Brown, A.L. & Chan, Y.C., 2008. Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadways include the effects of congestion in the roadway traffic flow? *Environmental Modelling & Software*, 23(10-11), pp.1262–1270.
- Smith, P., Wilson, M. & Armstrong, T., 2011. "I " ll just take the car ' Improving bicycle transportation to encourage its use on short trips, NZ.
- Song, G., Yu, L. & Tu, Z., 2012. Distribution Characteristics of Vehicle-Specific Power on Urban Restricted-Access Roadways. *JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING*, (February), pp.202–209.
- Sturm, P. et al., 1998. *Instantaneous Emission Data and Their Use in Estimating Passenger Car Emissions*, Graz.
- Sturm, P. & Hausberger, S., 1999. Estimating Real World Emissions from Passenger Cars - Use and Limitations of Instantaneous Emission Data. *International Journal of Vehicle Design*, pp.1–18.
- Unal, A., 2002. *On-Board Measurement and Analysis of On-Road Vehicle Emissions*. North Carolina State University.
- US EPA, 2009a. *Draft Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) 2009: Software Design and Reference Manual*, US.
- US EPA, 2009b. *Draft Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) 2009: User Guide*, US.
- US EPA, 2001. *EPA 's New Generation Mobile Source Emissions Model : Initial Proposal and Issues*, US.
- US EPA, 2002. *EPA 's Onboard Analysis Shootout : Overview and Results*, US.
- US EPA, 2004. *Technical Guidance on the Use of MOBILE6 . 2 for Emission Inventory Preparation*, US.

- Vojtisek-Lom, M. & Cobb, J., 1997. Vehicle Mass Emissions Measurement using a Portable 5-Gas Exhaust Analyzer and Engine Computer Data. In *Emission Inventory, Planning for the Future*. US.
- Vukanović, S., 1997. *Saobraćajne mreže I*, Beograd: Saobraćajni Fakultet.
- Washington, S., Wolf, J. & Guensler, R., 1997. Binary Recursive Partitioning Method for Modeling Hot-Stabilized Emissions from Motor Vehicles. *Transportation Research Record*, 1587, pp.96–105.
- Weilenmann, M., Bach, C. & Rüdý, C., 2001. Aspects of instantaneous emission measurement. *International Journal of Vehicle Design*, 27(1-4), pp.94–104.
- Weilenmann, M., Soltic, P. & Ajtay, D., 2003. Describing and compensating gas transport dynamics for accurate instantaneous emission measurement. *Atmospheric Environment*, 37(37), pp.5137–5145.
- West, B. et al., 1999. *Development and Validation of Light-Duty Modal Emissions and Fuel Consumption Values for Traffic Models*, US.
- West, B. et al., 1997. Development of data-based light-duty modal emissions and fuel consumption models. *SAE Technical Paper*, 972910.
- Zachariadis, T. & Samaras, Z., 1997. Comparative assessment of European tools to estimate traffic emissions. *International Journal of Vehicle Design*, 18(3/4), pp.312–325.
- Zallinger, M., Ahn, K. & Hausberger, S., 2005. Improving an instantaneous emission model for passenger cars. In *14th Symposium Transport and Air Pollution*. Graz, pp. 167–176.

---

## 10 Prilog

### Prilog 1. Kontrola sagorevanja i rada motora

Prioritet u kontroli sagorevanja u savremenim vozilima se menja u zavisnosti od stanja u kome vozilo radi. Sagorevanje se kontroliše preko računara, koji je programiran da se smanji emisija, poboljšaju ekonomičnost potrošnje goriva ili omogući željena dinamika (ubrzanje). U stanju zagrevanja, dinamika ima prioritet nad emisijom i potrošnjom goriva. Tokom vožnje u ekstremnim uslovima u saobraćajnom toku, prioritet može biti na dinamici dok ekonomičnost potrošnje može da bude primarna pri ravnomernoj vožnji velikim brzinama.

Optimalni odnos vazduha i goriva u smeši koja se sagoreva u motoru predstavlja kompromis između potrošnje goriva, optimalne snage i emisije polutanata. U uslovima savršenog sagorevanja se proizvode samo  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ . Hemijski balans je potreban za kompletno sagorevanje smeše goriva i vazduha i to stanje se naziva stehiometrijsko stanje. Najvažniji produkti sagorevanja su HC (deo VOC), CO i  $\text{NO}_x$  zbog emitovanih količina i značaja za formiranje kriterijumima za kontrolu zagađivača. Čak i u stehiometrijskim uslovima formiraju se  $\text{NO}_x$ , nesagoreli ugljovodonici i CO. Odnos vazduh-gorivo je ključna promenljiva u vrsti i veličini emisija proizvedenih u motoru, a emisija na kraju izduvne cevi će najviše zavisiti od efikasnosti katalizatora.

Kada postoji potreba za većom snagom motora, više goriva se uvodi u smešu vazduha i goriva. To su uslovi rada sa tzv. "bogatom smešom". U ovim uslovima nema dovoljno kiseonika u sistemu da se hemijski konvertuje ugljovodonike iz benzina u  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ . Tako se u uslovima rada sa bogatom smešom značajno povećava emisija CO i nesagorelih ugljovodonika (emisija CO čak i u većoj meri). Azot monoksid, se formira iz  $\text{N}_2$  i  $\text{O}_2$  u prisustvu visokih temperatura i pritiska. Ovi elementi su prisutni u velikim količinama u atmosferi, ali su stabilni zbog temperature i pritiska (u čistom vazduhu ima oko 78%  $\text{N}_2$  i 21%  $\text{O}_2$ ). U uslovima bogate smeše sav  $\text{O}_2$  se koristi za formiranje  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{CO}_2$ , tako da nema dovoljno  $\text{O}_2$  za reagovanje sa  $\text{N}_2$  i formiranje 2NO (koji je kasnije transformisan u  $\text{NO}_2$  u reakciji sa  $\text{O}_2$  u atmosferi). Tako se emisija  $\text{NO}_x$  smanjuju tokom rada sa bogatom

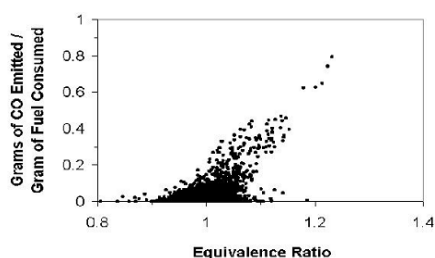


smešom. U suprotnom kada je smeša bogata kiseonikom emisija HC i CO je jako niska, a prisutan je porast emisija NO<sub>x</sub> (Grant 1998).

Da bi se razumeli uzroci emisija važno je razumeti osnovne odnose između funkcionisanja vozila i emisije izduvnih gasova.

Kratkoročni periodi visokih emisija CO se obično povezuje sa potrošnjom obogaćene smeše nego tokom normalnog rada. Tokom takvih režima nema dovoljno vazduha da gorivo potpuno sagori. Tako će emisija obuhvatiti više produkata nepotpunog sagorevanja, naročito CO. Katalitički konverter je u normalnim uslovima sposoban da oksidiše CO u CO<sub>2</sub>. Međutim, u uslovima rada sa obogaćenom smešom, ne postoji dovoljno kiseonika u izduvnim gasovima za kompletnu oksidaciju (Frey et al. 2002).

Emisiona stopa koja je predstavljena odnosom emitovanih grama CO i grama potrošenog goriva u svakoj sekundi se poredi sa ekvivalentnim odnosom goriva vozila. Ekvivalentni odnos koji je blizu jedinice označava stehiometrijsko sagorevanje. Odnos koji je veći od jedinice označava obogaćenu smešu goriva. Na slici se jasno vidi da se visoke emisije CO javljaju samo u toku rada sa obogaćenom smešom goriva. Pokazatelji ekvivalencije su izračunati iz podataka o protoku goriva i protoka vazduha usisnog sistema. Upotreba pomoćnih promenljivih koje odražavaju uticaj ključnih fizičkih faktora može biti neophodna jer nije verovatno da će odnos ekvivalencije ili protok goriva biti lako dostupni podaci u praksi. Pošto visok odnos ekvivalencije ima tendenciju da bude povezan sa visokim opterećenjem motora, kao što se javljaju prilikom ubrzanja, definišu se režimi (modovi) vožnje (ubrzanje, ravnomerna vožnja, usporenje i mirovanje) i izračunavanje emisija se vrši odvojeno za svaku režim.



Slika 10-1. Poređenje emisije CO i odnosa ekvivalencije (Source: Frey et al., 2001).

---

## Prilog 2. Ekonomičnost vozila u odnosu na potrebnu snagu

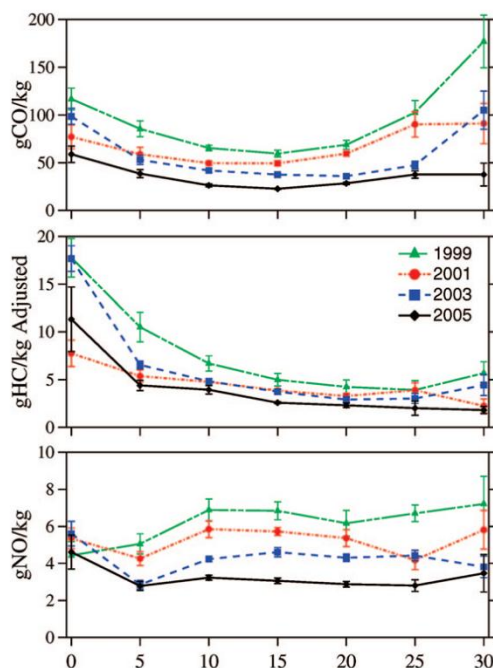
Odnos vazduh-gorivo u smeši je u funkciji brzine kretanja i snage koja se zahteva od motora što uslovljava varijacije emisija motora. Obrtni moment i snaga se regulišu promenom količine smeše u cilindrima motora. Kada je potrebna snaga (za ubrzanje, klimu, itd) mora se sagorevati dodatno gorivo. Tako smeša vazduh-gorivo postaje bogata gorivom, i emisija HC i CO se povećava, a smanjenje emisija NO<sub>x</sub>.

Odnos vazduh-gorivo utiče na balans između potrošnje goriva i snage (koja je presudna za emisiju zagađivača). Za ekonomičnu vožnju, svo gorivo mora da se sagori, dok za maksimalnu snagu sav vazduh mora da se sagori (što dovodi do veće potrošnje goriva). U principu, mešavina 10% bogatija gorivom od stehiometrijske proizvodi optimalnu snagu. Kako se odnos vazduh-gorivo povećava iznad tog odnosa, dolazi do smanjenje snage usled efekata hlađenja od isparenja viška goriva (Grant 1998). Mešavina 10% bogatija vazduhom proizvodi optimalnu potrošnju goriva. Emisije NO<sub>x</sub> će porasti, dok će emisije HC i CO opasti (Grant 1998).

Primer istraživanja na nivou voznog parka (Slika 10-2) pokazuje postepeno smanjenje uticaja opterećenja motora na emisiju. Korišćenjem podataka o nagibu saobraćajnice, brzini, ubrzanju definisana je specifična snaga vozila (vehicle-specific power (VSP)<sup>4</sup> u kilovatima po toni (Nesamani & Subramanian 2006). Uticaj VSP na emisije prikazan je na slici za četiri skupa podataka koji predstavljaju godine istraživanja.

---

<sup>4</sup> Specifična snaga vozila- vehicle-specific power (VSP)



Slika 10-2. Prosečne emisije po godinama u zavisnosti od specifične snage (Bishop & Stedman 2008)

U 1999. godini, oblik krive emisije CO u odnosu na VSP je konkavnog oblika sa približno trostrukom razlikom između minimalne emisije koja se ostvaruje na VSP=15 kW/t (oko 30km/h i 0.75 m/s<sup>2</sup> ubrzanja) i maksimalne emisije na VSP=30kW/t (oko 35km/h i 2.0 m/s<sup>2</sup> ubrzanja). Razlika u emisijama između ove dve tačke opterećenja u 2005. godini je statistički zanemariva, što znači da je daleko manji broj vozila vožen u uslovima sa obogaćenom smešom. Sa nižim emisijama CO bilo bi očekivano da se u istim tačkama opterećenja (VSP) emituju veće količine NO. Na suprot tome, emisije NO su takođe u opadanju, a kriva emisija u odnosu na specifičnu snagu vozila gubi svoj konkavni oblik. Isto se dešava i sa krivom emisija CO, iako veći broj vozila rade u stehiometrijskim uslovima (Bishop & Stedman 2008).

---

### **Prilog 3. Teorija kontrole sistema**

Pre svega je potrebno predstaviti neke osnovne koncepte upravljanja sistemima. To su upravljanje na osnovu povratne sprege (feedback) i na osnovu nepovratne sprege (feedforward).

Upravljanje na osnovu nepovratne sprege se zasniva na anticipaciji odnosno korišćenju prethodnih informacija. To znači da postoje upravljačke akcije na osnovu nekog plana odnosno ne čeka se da dođe do pogoršanja rezultata (izlaza).

Upravljanje na osnovu povratne sprege je reaktivno upravljanje gde se stalno vrši korekcija rezultata. Upravljačke mere su uvek u zakašnjenju jer ih generiše neka greška.

Razlikuju se ulazne veličine koje u određenom procesu daju rezultate (izlazne veličine). Senzori služe za registrovanje rezultata. Senzori mogu da budu neprecizni. Pored toga na izlaz mogu uticati dodatni efekti koji se u teoriji kontrole sistema nazivaju šum. Šum se javlja kao posledica poremećaja (disturbance) i nepouzdanosti (uncertainty) elemenata sistema i on je uvek prisutan u svim sistemima. Na osnovu tako definisanih izlaza kontroler određuje mere koje treba da omoguće promenu ulaznih veličina koje će proizvesti željeni rezultat.

Kod pouzdanijih modela koji bolje odslikavaju sistem, bolje je upravljanje pomoću nepovratne veze. Ipak, takvo upravljanje je osetljivo na poremećaje i nepouzdanosti. S druge strane, kod modela sistema koji lošije odslikavaju sistem neminovno se javlja šum. Kontrola sistema se sastoji u nalaženju balansa između nepovratne i povratne veze.

Definicija sistema: sistem je skup elemenata koji reaguju među sobom i sa svojom okolinom.

Definicija modela: model je sistem koji se koristi da bi se predstavio neki drugi sistem.

Konceptualno modeli dinamičkih sistema treba da sadrže tri grupe elemenata:

Parametri - nepromenljive karakteristike sistema odnosno struktura sistema,

Promenljive - koje definišu kako se sistem menja u vremenu odnosno kako se sistem menja u određenim opsezima.

Zakoni promene - definišu kako se menjaju vrednosti u zavisnosti od prethodnih vrednosti i parametara odnosno principi po kojima sistem funkcioniše.

Model treba da bude u stanju da proizvede vrednosti rezultata koji su zabeleženi u prošlosti ali isto tako i da predvidi vrednosti koje će se dobijati u budućnosti. Ako je model u stanju da sa određenom pouzdanošću to uradi onda je reč o dobrom modelu i može se reći da smo razumeli sistem.

Diferencijalne jednačine.

Diferencijalne jednačine su osnovni matematički alat za modeliranje dinamičkih sistema. Različiti tipovi dinamičkih sistema se opisuju različitim tipovima diferencijalnih jednačina. Diferencijalna jednačina predstavlja vezu između funkcije  $f(x)$ , promenljive  $x$  i svih izvoda funkcije ( $f'(x)$ ,  $f''(x)$ ...).

Ordinarna diferencijalna jednačina podrazumeva da je:

$$f(t) = y$$

i da je:

$$F(y^n, y^{n-1}, \dots, y'', y', y, t) = 0$$

Autonomna diferencijalna jednačina neće zavisiti od vremena tj.

$$F(y^n, y^{n-1}, \dots, y'', y', y) = 0$$

Parcijalna diferencijalna jednačina ima u sebi izvode po više promenljivih.

U okviru ordinarnih diferencijalnih jednačina postoje specijalne jednačine - linearne diferencijalne jednačine. Opšti oblik ovih jednačina je:

$$a_n(t)y^{(n)} + a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y' + a_0(t)y = g(t)$$

A jednačina koja ima opšti oblik

$$a_n(t)y^{(n)} + a_{n-1}(t)y^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y' + a_0(t)y = 0$$

je homogena jednačina. Sistem koji je opisan homogenom jednačinom je (unforced) sistem. To je u stvari sistem na koji nema spoljnog uticaja

$$g(t) = 0$$

odnosno sistem sam evolvira.

Dodatno, ukoliko je jednačina takva da koeficijenti (a) ne zavise od t,

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 y' + a_0 y = g(t)$$

Onda je u pitanju linearna vremenski nezavisna diferencijalna jednačina (LTI - Linear Time Invariant). Iako postoji ulaz  $g(t)$  ona je nezavisna od vremena jer se koeficijenti ne zavise od t. Odnosno, postojanje ulaza  $g(t)$  daje rezultat  $y(t)$ , a jednačina je nezavisna od vremena jer će ulaz  $g(t+\tau)$  dati rezultat  $y(t+\tau)$ . Na ove jednačine se primenjuju Laplasove transformacije.

Jednačine će samo imati malo drugačiji oblik

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 y' + a_0 y = b_m u^{(m)} + b_{m-1} u^{(m-1)} + \dots + b_1 u' + b_0 u$$

To radimo jer želimo da uspostavimo vezu između  $y$  kao izlaza iz sistema i  $u$  kao ulaza u sistem. Dobar način za to je modifikovanje parametara  $a$  i  $b$ .

Važan preduslov je da  $n$  bude veće ili jednako  $m$ , što znači da su sadašnji događaji određeni na osnovu prethodnih.

Stanje sistema: minimalni set promenljivih čije je poznavanje u trenutku  $t_0$  zajedno sa spoljnim pobudama dovoljno da se potpuno odredi ponašanje sistema za trenutke nakon  $t_0$ . Stanja ima mnogo, a ne samo jedno. Važno je da stanje definiše minimalni broj promenljivih. Kombinacija promenljivih stanja je izlazni signal.

Kada ne želimo da ulazimo u strukturu sistema odnosno interesuje nas samo ulaz i izlaz iz sistema, sistem se predstavlja „crnom kutijom“ (external description). Ulazni signal prolazi kroz blok koji predstavlja sistem i stvara određeni izlazni signal. Ta transformacija se dešava u skladu sa funkcijom prenosa koja definiše način transformacije ulaza u izlaz.

Pošto se „crnom kutijom“ zanemaruju sve promenljive koje čine sistem, može se desiti da se na osnovu istog signala primenjenog na ulazu dobiju različiti izlazni signali, u zavisnosti od stanja u kome se sistem nalazi. Zato se u radu sa „crnom kutijom“ sve promenljive sistema izjednačavaju sa nulom.

Originalna „crna kutija“ se može razviti na više blokova od kojih je izlaz iz prvog ulaz u naredni. Tada je reč o unutrašnjem opisu sistema (internal description) gde će određeni delovi sistema imati svoje izlazne veličine koje je moguće kontrolisati i koje predstavljaju stanje sistema.

Primeri rada sa „crnom kutijom“ su impulsni odziv i funkcija prenosa dok su primeri unutrašnjeg opisa diferencijalne jednačine i prostor stanja. Ovde će fokus biti na funkciji prenosa.

Operacije na blok dijagramima su prilično direktne. Rad na blok dijagramima omogućava da direktno odredite ponašanje sistema. Ne treba se vraćati na tabele već je jedino bitno da se na osnovu ulaza dobija isti izlaz. Algebra blok dijagrama se zasniva na svođenju sistema na paralelnu vezu blokova ili na povratnu spregu. Koriste se karakteristike pristupnih tačaka, tačaka sabiranja/oduzimanja i mogućnost multiplikativnosti (dva bloka redno vezana su proizvod njihovih funkcija) i komutativnosti (sumiranje signala željenim redosledom).

Operacije u blok dijagramu prebačene u s domen mogu se samo množiti za razliku od onih koje su predstavljene u t domenu.

U slučaju da postoji impulsni ulazni signal koji se označava sa  $\sigma(t)$  (impuls ima površinu jednaku 1, odnosno amplitudu  $1/T$  na intervalu  $T$ ) i ako smo u mogućnosti da za takav ulaz zabeležimo izlaznu funkciju i svi inicijalni uslovi su jednaki nuli. U stanju smo da za svaki ulazni signal dobijemo izlazni signal. Odnosno na taj način je sistem potpuno opisan.

To znači da za ulaz koji je označen sa  $u(t)$ , dobijamo izlaz na osnovu konvolucije:

$$y(t) = g(t) * u(t) = \int_0^t g(t) \cdot u(t - \tau) d\tau$$

Posledice u s domenu su vidljive primenom Laplasove transformacije:

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s)$$

Laplasova transformacija izlaza jednaka je proizvodu Laplasovih transformacija odziva na impuls i ulaza. Funkcija prenosa,  $G(s)$ , je Laplasova transformacija odziva na impuls.

Razlika između statičkih i dinamičkih sistema.

Kod statičkih sistema rezultat će biti prost proizvod/količnik ulaznog signala (uvećan ili umanjen određenom konstantom). Statički sistem će za istu vrednost ulaznog signala uvek davati istu vrednost izlaznog signala dok kod dinamičkog sistema to ne mora da bude slučaj jer će vrednost izlaza zavisiti i od svih prethodnih vrednosti izlaza.

Funkcija prenosa

Odziv sistema prvog reda na stepenastu funkciju

Odziv sistema drugog reda na stepenastu funkciju: Moj sistem je sistem sa realnim polovima i to sa dva različita (overdumped sistem). Jedino treba razjasniti šta znači kada u funkciji prenosa postoji vremenski pomak (delay).

Izlaz se računa po formuli:

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s)$$

$$Y(s) = K \frac{1}{\left(\frac{s}{p_1} + 1\right)\left(\frac{s}{p_2} + 1\right)} \cdot \frac{1}{s} = \frac{K \cdot p_1 \cdot p_2}{(s + p_1)(s + p_2)s} = \frac{r_1}{s} + \frac{r_2}{(s + p_1)} + \frac{r_3}{(s + p_2)}$$

$$r_1 = \left[ \frac{K \cdot p_1 \cdot p_2}{(s + p_1) \cdot (s + p_2)} \right]_{s=0} = K$$

$$r_2 = \left[ \frac{K \cdot p_1 \cdot p_2}{s \cdot (s + p_2)} \right]_{s=-p_1} = \frac{K \cdot p_1 \cdot p_2}{-p_1 \cdot (-p_1 + p_2)} = \frac{K \cdot p_2}{p_1 - p_2}$$

$$r_3 = \left[ \frac{K \cdot p_1 \cdot p_2}{s \cdot (s + p_1)} \right]_{s=-p_2} = \frac{K \cdot p_1 \cdot p_2}{-p_2 \cdot (-p_2 + p_1)} = \frac{K \cdot p_1}{p_2 - p_1}$$

Iz toga direktno sledi na osnovu inverzne Laplasove transformacije da je:

$$y(t) = K \left[ 1 + \frac{p_2}{(p_1 - p_2)} \cdot e^{-p_1 t} + \frac{p_1}{(p_2 - p_1)} \cdot e^{-p_2 t} \right]$$



Izlazni signal se sastoji iz dva dela. Prvi deo je prolazni ili nestajući deo (transient response) i fiksni ili stabilni deo (steady state response). Prolazni deo sa protokom vremena teži ka nuli:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_t(t) = 0$$

S druge strane stabilni deo je konstantan tokom vremena.

Kada se ulazni signal konstantno menja kao što je slučaj kod svih realnih sistema teško je utvrditi koji deo izlaza je prolazni, a koji stabilni deo. Zato ovaj sistem ima smisla samo u situacijama kada je ulazni signal neka funkcija koja se ne menja značajno u vremenu, kao što su impulsna, stepenasta ili sinusna funkcija.

Kako je Laplasova transformacija izlazne funkcija predstavljena kao:

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) = Y_1(s) + Y_2(s) + \dots + Y_n(s)$$

Inverznom Laplasovom transformacijom se dobijaju vrednosti funkcija u t domenu:

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) + \dots + y_n(t)$$

Većina ovih funkcija će imati oblik  $e^{-xt}$ , gde od veličine eksponenta x zavisi koliko će dugo trebati funkciji da opadne do 0. Kada sve funkcije opadnu do 0 može se reći da je sistem u stabilnom stanju i tada je jedina preostala funkcija stabilnog stanja.

Za definisanje vremena kada funkcija ulazi u stabilno stanje koristi se parametar, vreme umirivanja (settling time).

Oba dela (prolazni i stabilni deo) su podjednako važna. Stabilni deo se povezuje sa preciznošću. To je ona vrednost na kojoj će sistem završiti u stabilnom stanju. Kod nekih sistema veća greška u stabilnom stanju može da bude prihvatljiva (kontrola temperature u sobi), a kod drugih se može zahtevati veća preciznost (opasni hemijski procesi). Prolazni deo funkcije nam govori o tome na koji način se dolazi od početne vrednosti do stabilne vrednosti (nagib, sa oscilacijama ili ne...).

Uobičajene funkcije koje se koriste u analizi sistema su impulsna, stepenasta, nagibna i parabola. Njihove Laplasove transformacije su po redu: 1, 1/s, 1/s<sup>2</sup>, 1/s<sup>3</sup>. Svaka funkcija u obrnutom redosledu izvod prethodne funkcije (izvod stepenaste funkcije je impulsna funkcija). To praktično znači da se odziv na navedene funkcije može izračunati na osnovu izvoda poznate funkcije, iako se to u praksi ne radi baš tako. Praktično, najveći značaj ima odziv stepenaste (Hevisajdove) funkcije. Impulsna funkcija je pogodna za analizu stabilnosti.

Prethodno je bilo rečeno da se sve karakteristike dinamičkog sistema nalaze u odzivu na impuls. Međutim pored karakterizacije prenosa potrebna je i protumačiti sistem. To je mnogo lakše upotrebom odziva na stepenastu funkciju. Odzivi na nagibnu funkciju i parabolu su korisni za definisanje stabilnog stanja i preciznosti.

Četiri parametra opisuju odziv funkcije na stepenastu funkciju:

Prekoračenje (overshoot)  $M_p = \frac{y_{\max} - y_{ss}}{y_{ss}}$ , i to je odnos razlike maksimalne

vrednosti f-je i vrednosti stabilnog stanja i vrednosti stabilnog stanja. Izraženo je u procentima. Vreme maksimalne vrednost (peak time -  $t_p$ ). Trenutak kada se maksimalno prekoračenje dešava. Vreme porasta (rise time -  $t_r$ ). Vreme potrebno da bi se od početne vrednosti dostigla određena vrednost stabilnog stanja ( $y_{ss}$ ). Govori o brzini sistema odnosno odziva sistema. Vreme smirivanja (settling time -  $t_s$ ). Vreme koje je potrebno da odziv sistema uđe u određeni opseg oko vrednosti stabilnog stanja (iz koga neće više izaći). Taj opseg je opseg greške ( $\pm\alpha\%$  oko  $y_{ss}$ ). Govori kada je ostao samo stabilni deo (prolazni deo je opao na nulu).

Redukcija reda funkcije prenosa. Dominacija i otkazivanje.

Dominaciju polova određuje njegova blizina koordinatnom početku. Ali u kom slučaju možemo zanemariti drugi pol. Kriterijum 5 rastojanja od dominantnog pola do nule je opseg van kog bi se nalazio drugi pol tako da bi ga zanemarili. Zanemaruje se samo dinamički deo funkcije prenosa, a ne doprinos (gain). Treba uraditi proveru za  $G(0)$  za stari i redukovani sistem. Te vrednosti treba da budu jednake. Zato  $G(s)$  treba prikazivati u obliku:

$$G(s) = K \frac{\left( \frac{s}{p_1} + 1 \right)}{\left( \frac{s}{p_1} + 1 \right) \left( \frac{s}{p_2} + 1 \right)}$$

Tako će se redukovati i priraštaj u novoj funkciji.

LTI sistemi imaju samo jednu tačku ekvilibrijuma što je stabilnost sistema ali se ta tačka pomera i javlja na više pozicija odnosno u različitim kombinacijama ulaza i izlaza. To znači da je jedina tačka ekvilibrijuma u stabilna,

Kod nelinearnih sistema ima više tačaka ravnoteže pa se za svaku tačku utvrđuje stabilnost. Definicija stabilnosti (BIBO – bounded input bounded output) – Sistem je stabilan ako ograničeni ulazi daju ograničene izlaze. Stabilnost je osobina sistema, a ne nešto što zavisi od vrste ulaza. Ugrađena je u sistem. (Moj sistem je stabilan).

Teorema: Sistem je BIBO stabilan samo ako je:

$$\int_0^{\infty} |g(t)| dt < M < \infty$$

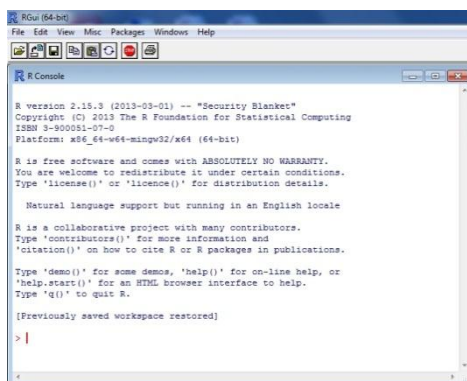
Odnosno da sistem konvergira ka nekom konačnom broju. Gde je  $g(t)$  odziv na impulsni signal.

Greška u sistemu: grešku u sistemu možemo utvrditi na osnovu tipa funkcije prenosa sistema sa otvorenom petljom. Kada u funkciji prenosa nema integratora ( $1/s$ ) to znači da će se na stepenastom ulazu javljati greška  $1/K$ , dok će takva funkcija moći bez greške da prati impulsni ulaz. Postojanje integratora pomera mogućnosti funkcije, pa može da se prati nagibna funkcija sa greškom, a stepenasta bez greške. Postojanje kvadrata integratora uslovljava mogućnost funkcije da prati parabolu sa greškom, a nagibnu bez greške.

Postojanje integratora u funkciji prenosa sistema sa otvorenom petljom, odnosno broj integratora predstavlja pokazatelj koji određuje tip sistema, odnosno tip povratne petlje. Dodavanje integratora utiče na preciznost ali isto tako, utiče i na nestabilnost.

## Prilog 4. R softver – Tačkasti ili rasuti dijagram

Softver R je besplatan softver za statističku analizu podataka. Jedna od osnovnih prednosti je mogućnost lakog formiranja tačkastih ili rasutih dijagrama (Scatter plot dijagrama).



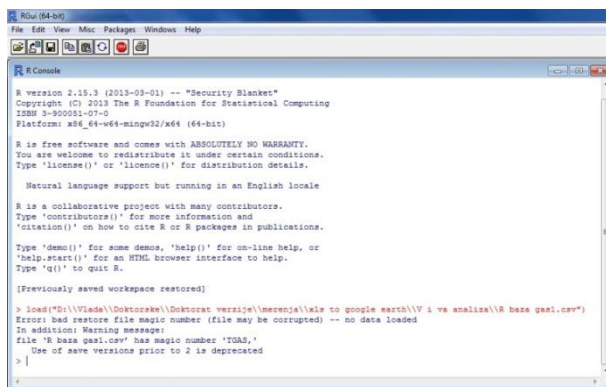
Slika 10-3. Početni ekran R softvera

Procedura rada sa R softverom zahteva savladavanje osnovne sintakse programiranja u ovom softveru. Sintaksa nema velikih specifičnosti u odnosu na uobičajene programske komande koje se koriste u matlabu ili drugim programima sličnog tipa.

Za otvaranje baze podataka sa kojom će se raditi potrebno je da baza bude snimljena u excelu kao csv (comma separated value), odnosno tako da su sve vrednosti u bazi odvojene zarezima. CSV je standardni format u excelu u kome se mogu čuvati podaci.

Prevuče se \*.csv baza podataka u prozor R softvera da bi se dobila adresa fajla na računaru. To je u ovom slučaju, npr:

```
"D:\\Vlada\\Doktorske\\Doktorat verzije\\merenja\\xls to google earth\\V i  
va analiza\\R baza gas1.csv"
```

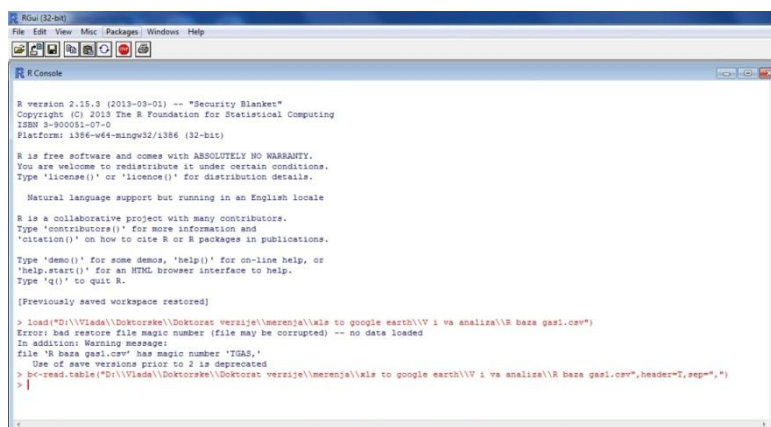


Slika 10-4. Adresa baze podataka u R softveru

U sledećem koraku se učitava \*.csv baza podataka u R softver. Bazi podataka sa konkretne adrese daje se ime kojim će se baza pozivati svaki put kada želimo da radimo sa podacima iz baze. Potrebno je dodati i komande koja upućuje na to da se zadrže nazivi kolona kao i naznaka simbola kojim su razdvojeni podaci u tabeli. Komanda je navedena u narednom redu.

```
b<-read.table("D:\\Vlada\\Doktorske\\Doktorat verzije\\merenja\\xls to
google earth\\V i va analiza\\R baza gas1.csv",header=T,sep=",")
```

Naziv tabele podataka u R softveru će biti „b“. Komanda „read table“ omogućava učitavanje tabele. Zatim se kopira adresa \*.csv fajla i dodaje komanda za zadržavanje naziva kolona (header=TRUE ili T) i naznaka simbola kojim su razdvojeni podaci u tabeli (sep=",").



Slika 10-5. Učitavanje i imenovanje baze podataka u R softveru

Za proveru učitanih vrednosti može se koristiti više komandi:

- Str(ime) – skraćeno od „structure“ i daje pregled strukture podataka

- Summary(ime) – daje osnovne statističke podatke po kolonama podataka
- Fix(ime) – otvara tabelu podataka slično onoj u excel-u i omogućava korekciju podataka i naziva kolona

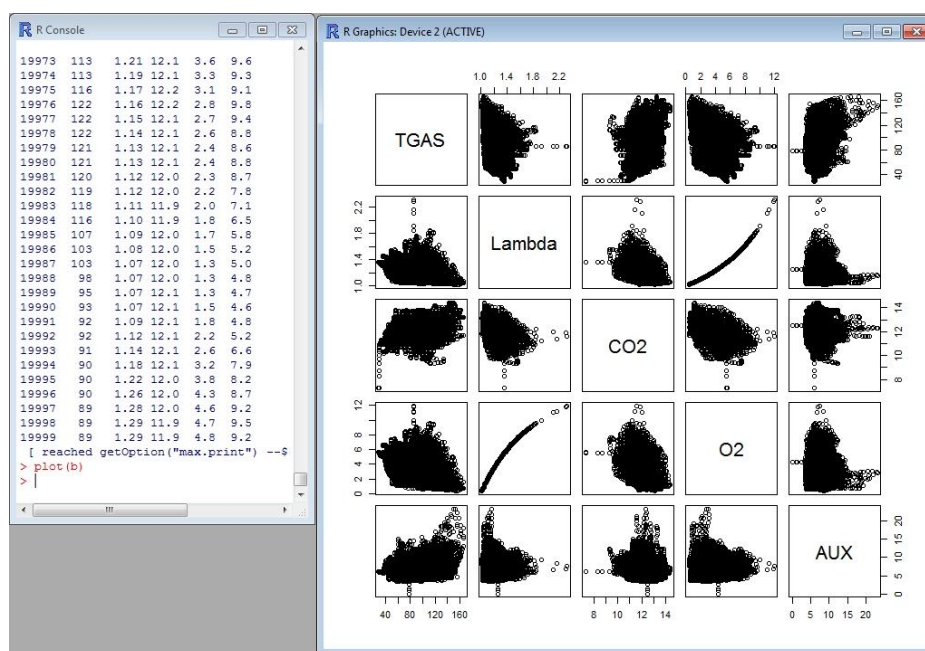
Baza podataka predstavlja izvor podataka za utvrđivanje stepena korelacije između kolona.

Grafičko prikazivanje samo jedne kolone iz tabele se može izvesti komandom: Plot(ime baze\$ime kolone).

Grafičko prikazivanje korelacije dve kolone podataka: Plot(ime baze\$ime kolone,ime baze\$ime kolone)

Grafičko prikazivanje matrice korelacija između svih kolona u podacima se radi komandom: Plot(ime baze)

Grafičko prikazivanje samo određenih kolona baze podataka zahteva navođenje naziva svih kolona u formi: pairs(~ime kolone 1+ ime kolone 2+ ime kolone 3,data=ime baze,main="naziv rasutog dijagrama")



Slika 10-6. Primer rasutog dijagrama za više kolona podataka

## Prilog 5. Širina klasa ulaznih podataka u proces modeliranja

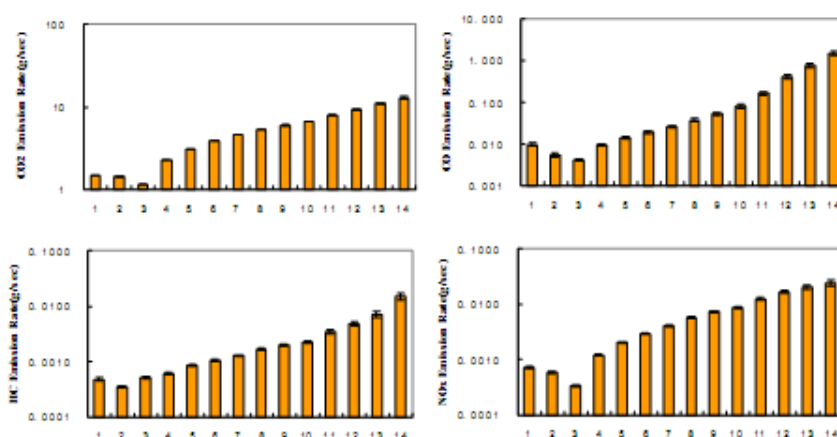
Sa praktične strane nema smisla definisati klase tako da vrednosti srednjih emisija budu slične pošto je cilj da se objasni varijabilnost emisija. Zato je moguće primeniti kontrolisani pristup sa prethodno definisanim klasama. Razlozi su što svaka klasa treba da ima statistički značajnu razliku u odnosu na druge klase i što nijedna klasa ne treba da dominira u proceni ukupne emisije za tipično putovanje.

U sledećoj tabeli i slici prikazan je primer podataka koji su statistički relevantni za razvoj modela i zasnovani su na specifičnoj snazi motora (Tabela 10-1 i Slika 10-7).

Tabela 10-1. Rasponi klasa specifičnih snaga (VSP – Vehicle specific power)

VSP Mode	Definition
1	$VSP < -2$
2	$-2 \leq VSP < 0$
3	$0 \leq VSP < 1$
4	$1 \leq VSP < 4$
5	$4 \leq VSP < 7$
6	$7 \leq VSP < 10$
7	$10 \leq VSP < 13$
8	$13 \leq VSP < 16$
9	$16 \leq VSP < 19$
10	$19 \leq VSP < 23$
11	$23 \leq VSP < 28$
12	$28 \leq VSP < 33$
13	$33 \leq VSP < 39$
14	$39 \leq VSP$

U prvoj koloni tabele je redni broj klase specifičnih snaga dok su drugoj rasponi koje snaga koje klasa obuhvata.



Slika 10-7. Prosečne režimske emisije za 14 klasa za osnovne zagađivače (CO<sub>2</sub>, CO, HC i NO<sub>x</sub>) na osnovu podataka za modeliranje

Na slici su prikazane klase relevantne za razvoj modela. Podaci prikazuju da nijedna klasa ne učestvuje u ukupnoj emisiji sa dominantnim udelom.

Pitanje opisivanja odstupanja i neizvesnosti: Potrebno je definisati obim uzoraka i standardno odstupanje srednje vrednosti klase. Ako je uzorak manji od 40 i ako je standardno odstupanje veće od 20% preporučuje se upotreba bootstrap simulacije za kvantifikovanje raspodele srednjih vrednosti uzorka. U ostalim slučajevima pretpostavka normalne raspodele je prihvatljiva.



## Prilog 6. Efektivno ubrzanje i specifična snaga

Kod efektivnog ubrzanja se uzima u obzir nagib saobraćajnice.

$$a_{ef} = a_{st} + 22.15 \cdot R$$

Gde je:

$a_{ef}$  (km/h/s) - efektivno ubrzanje uključujući nagib

$a_{st}$  (km/h/s) - stvarno ubrzanje na osnovu zabeležene promene brzine

$R$  - nagib saobraćajnice

Faktor 22.15 (milja/h/s) predstavlja ubrzanje usled gravitacije. Na primer, vozilo koje održava konstantnu brzinu duž nagiba od 4% mora da ubrza 0,89 milja/h/s da bi se suprotstavilo uticaju gravitacije. Potrebna snaga motora je procenjena na osnovu efektivnog ubrzanja kako bi se približno odredilo opterećenje motora.

$$P = V \cdot a_{ef}$$

Gde je:

$P$  - potrebna snaga motora (km/h/sec)

$V$  = brzina vozila (km/h)

S obzirom da su odabrane deonice bez nagiba (ili sa zanemarivim nagibom) jednačina se svodi na množenje brzine i ubrzanja. Jedinica u kojoj je predstavljena potrebna snaga motora je  $\text{km}^2/\text{h}^2/\text{sec}$ .

Pored efektivnog ubrzanja može se primeniti i pristup na osnovu specifične snage motora (VSP – Vehicle Specific Power) koja se takođe procenjuje korišćenjem stvarnog ubrzanja i nagiba saobraćajnice.

$$VSP = (0.278 \cdot V) [1.1 \cdot (0.278 \cdot a_{st}) + 9.81 \cdot \sin(\arctan(R)) + 0.132] + 0.302 \cdot 10^{-3} \cdot (0.278 \cdot V)^3$$

Gde je:

VSP- specifična snaga motora (KW/metričkoj toni)

Konverzija faktor 0.278 služi za konvertovanje jedinica za brzinu iz km/h u m/s i za konverziju jedinica za ubrzanje iz km/h/s u m/s<sup>2</sup>. Ostali koeficijenti dati u

prethodnoj jednačini kao što je koeficijent mase i predstavlja ekvivalentnu translatornu masu rotirajućih komponenata (npr. točkova, zupčanika, vratila), koeficijent otpora kotrljanju i otpor vazduha i čeonog vetra, su ili specifični za vozila ili nisu definisani. Specifična snaga bi mogla da bude procenjena na osnovu prosečnih ili tipičnih vrednosti koeficijenata i brzine vozila, ubrzanja i nagiba. (Frey, Unal, Chen, et al. 2003)

## Prilog 7. Broj zabeleženih podataka u odnosu na brzinu i potrebnu snagu

Ve/klaše	-340	-320	-300	-280	-260	-240	-220	-200	-180	-160	-140	-120	-100	-80	-60	-40	-20	-5
1																		6581
2																	1	479
3																	24	217
4																	90	117
5														1	1	9	87	74
6						1									4	41	77	51
7															10	49	58	27
8													1	4	11	47	41	23
9													1	7	29	55	45	28
10												1	1	5	28	59	43	20
11													4	12	44	38	34	23
12												1	4	23	36	40	31	32
13											1	1	12	20	43	30	32	24
14									1	2	1	10	23	45	36	43	28	
15								2	2	3	3	8	36	41	25	47	36	
16									2	4	8	22	26	36	30	54	34	
17									1	6	5	11	25	45	36	32	65	51
18							1		1	4	4	14	27	27	43	44	63	64
19							1			3	9	16	22	34	36	36	72	50
20			1							4	7	18	25	38	22	44	80	50
21							1	1	3	2	6	21	40	42	38	33	88	87
22							1	3	4	7	11	18	25	42	34	46	73	86
23						1	1	3	7	7	7	16	27	41	23	33	77	64
24							1	2	4	4	11	20	35	40	43	44	102	66
25							2	2	5	8	18	20	41	32	30	53	77	36
26					1		1	2	2	13	19	25	31	35	44	48	62	38
27				1		2	2	2	3	9	12	27	25	34	28	58	72	44
28	1			1	1	3	4	3	8	14	24	34	47	26	62	81	79	70
29							1	3	13	13	28	25	23	42	55	91	70	70
30						2	1	4	4	5	15	20	27	38	46	48	110	67
31				1	1	2	2	6	7	13	26	21	31	38	37	80	93	81
32					1		1	4	8	12	16	22	25	42	46	62	96	65
33					2	1	2	3	3	10	19	24	27	26	41	82	97	78
34		1				1	1	8	2	11	13	14	22	26	43	68	112	55
35					1	1	3	4	6	7	11	25	22	26	50	81	115	64
36			1		1	1	2	3	8	7	13	25	18	29	52	93	118	82
37					1	2	4	3	4	8	11	21	20	30	53	100	126	84
38						2	1	3	6	5	13	14	22	38	50	93	104	97
39				2				5	5	12	10	13	12	30	51	112	102	72
40				1	1	1	1	2	4	11	11	15	19	28	61	110	93	89
41			1		1	1	2	4	2	9	13	5	15	37	60	100	103	82
42					1		1	2	1	2	7	12	23	18	63	95	102	62
43					1	1	1	3	6	7	7	18	12	25	50	110	78	59
44		1	1				2	3	5	9	6	12	20	26	64	90	99	45
45					1		3	2	1	4	6	10	8	20	59	98	98	88
46		1				1	2	2		1	3	9	15	34	52	107	104	70
47					1	1		3	3	3	4	7	14	27	55	85	106	67
48	1	1				1	1	1	5	4	2	3	13	25	58	102	126	90
49				1				1	3	2	2	4	15	27	52	95	126	103
50	1						1	2	2	4	2	11	23	54	85	117	79	79
51			1					2	2		3	4	7	14	39	96	112	89
52						1			1	2	1	3	8	15	38	89	109	86
53					1	1				2	1	3	2	19	36	82	98	61
54									1		1	3	6	11	35	73	98	49
55								1		2	1	2	8	8	38	61	103	67
56								1		1		1	6	8	34	56	79	68
57				1					1			1	1	8	31	41	86	76
58							1				2	2	3	5	17	30	71	54
59							1		1	2		2	1	5	16	20	43	28
60	1										1		1	2	13	23	44	45
61												2	2	5	6	14	20	29
62							1			1	1			2	5	5	24	12
63											1	1	2	5	6	7	11	13
64													1		5	7	4	10
65								1						4	3	4	10	6
66									1				2		2	4	11	12
67												1		1	2	5	14	12
68												1	1	1	3	7	10	3
69												1		1	2	5	12	11
70						1						1	1	1	1	1	10	5
71												1	2	1	2	4	4	3
72											1		2			3	4	2
73														2	2		4	4
74									1						1		1	1
75		1														4	3	2
76													1			2	9	3
77														1		1	5	4
78															1		9	6
79									1				1			1	4	9
80												1						
81															1	1	2	2
82																2		1
83																1	2	
84															1	1		
85															1	1		
86															1	1		
87															1	1	1	

Vklase	5	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	320	340
0	4993																
1	407																
2	139																
3	88	5															
4	43	63															
5	27	87															
6	20	29	33														
7	11	17	55	7													
8	11	17	27	28													
9	13	16	18	41	5												
10	14	18	14	37	24	1											
11	15	23	21	24	29	14	1										
12	11	28	18	29	40	21	3										
13	11	25	20	17	25	26	9										
14	18	31	19	31	25	19	8	1									
15	33	49	24	27	27	16	10	3									
16	30	57	42	42	20	19	12	10	1								
17	39	66	53	40	35	22	14	7									
18	62	91	63	33	22	18	16	7	4								
19	34	88	80	46	23	19	12	10	3								
20	49	89	87	49	41	16	9	8	4								
21	66	75	62	65	50	18	5	1	3							1	
22	86	80	45	53	46	21	2	1	2		1						
23	77	69	40	57	67	38	11	6									
24	38	44	60	49	53	49	28	3									
25	43	63	48	53	55	58	30	12	1	1		1					
26	33	64	46	45	46	31	29	16	1								
27	46	53	42	58	50	45	28	19	7								
28	49	69	41	45	50	49	49	22	8	1							
29	59	80	47	34	45	49	41	29	12	3	1						
30	64	70	47	39	42	55	34	23	12								
31	71	74	55	52	59	39	42	20	11	4	2						
32	64	91	72	61	35	39	36	38	12	4		1					
33	58	103	71	53	56	30	36	36	19	1	3	1					
34	59	113	86	55	43	29	41	19	17	7	3	1					
35	60	100	82	62	71	26	31	13	14	1	2						
36	75	111	85	86	57	32	26	23	12	8	1						
37	70	111	95	87	49	27	25	16	9	3	3	1					1
38	74	110	89	82	51	37	20	16	13	2	2						
39	73	117	89	78	58	53	22	9	4	3	1		1				
40	68	101	80	72	63	33	17	20	4	3	1		1				
41	86	77	79	74	54	37	31	17	3	2			1				
42	58	95	68	65	62	39	30	6	9	1	1	2					
43	41	82	74	55	53	43	28	4	2	2	1						
44	46	99	59	65	56	42	25	18	4		1			1			
45	51	104	68	41	48	32	22	7	4	1	1						
46	76	141	65	55	59	38	19	13	3	1	1						
47	54	97	77	46	41	27	15	12	4	1						1	
48	82	122	68	52	46	23	16	9	2	3							
49	85	111	69	48	38	30	17	10		3				2			
50	71	81	78	57	40	21	13	6	6			1	2				
51	63	83	60	45	37	22	13	4	4	3	1						
52	59	90	66	47	46	9	11	4	7	1	2						
53	48	85	55	47	27	6	10	8	2	2					1		
54	38	76	76	32	26	14	10	3	1	1	2						
55	91	91	62	31	17	9	3	3	2		1						
56	42	79	53	28	13	7	6	4	1		1	2					
57	86	86	50	21	13	3	9	1	2	1	2						
58	32	74	41	20	8	5	3	2	1			1					
59	19	47	26	9	9	6	3			1	1	1					
60	34	45	19	7	7	3	1				2	1			1		
61	21	25	10	13	6	1	3	1	1	1	1	1				1	
62	13	17	8	6	4	3	2			1							
63	7	20	4	4	4	4	2							1			
64	4	9	9	2	1	1		1		2							
65	3	2	4	4	1	1	3		1			1					
66	9	5	5	1		2	2										
67	7	4	5				1	1	2	1							
68	11	6	4	5	2		1			1							
69	5	6	5	1	2	1	1	1	1		1						
70	12	11	5	1	2	2											
71	2	4	2	1	2				1								
72	3	11	3		2			1			1						
73	3	5	4		1					1							
74		2	4						1					1			
75		2	1	1													
76	4	5	1	2					1		1						
77		3	1	1							1						
78	3	5	3	2			1		1								
79	3	2	2														
80					1		1										
81	1	3	2		1												
82			2	1													
83						1											
84		1	1														
85				1													
86		1		1	1												
87	1	2		1													

## Prilog 8. Prosečna emisija CO u odnosu na brzinu i potrebnu snagu

Vklase	-240	-220	-200	-180	-160	-140	-120	-100	-80	-60	-40	-20	-5
0													0.1055
1												0.3673	0.1971
2												0.3101	0.2710
3												0.3179	0.3093
4											0.3778	0.3308	0.3310
5									0.1795	0.4439	0.3910	0.3258	0.3250
6										0.4090	0.3713	0.3444	0.2638
7										0.3532	0.3596	0.3139	0.2448
8								0.2247	0.4590	0.3346	0.3205	0.3419	0.3548
9								0.5345	0.2984	0.3698	0.3672	0.3603	0.3600
10							0.3974	0.3837	0.3965	0.3898	0.3401	0.3408	0.3720
11								0.5290	0.4254	0.3727	0.4103	0.3304	0.4039
12							0.4540	0.4697	0.4788	0.3441	0.3553	0.3792	0.3946
13						0.1554	0.7124	0.4439	0.4120	0.3760	0.3505	0.3303	0.3760
14					0.3953	0.5733	0.3257	0.5155	0.4590	0.3897	0.4353	0.3740	0.3307
15			0.3946		0.3344	0.6556	0.5260	0.4572	0.3624	0.3586	0.4092	0.3581	0.3739
16					0.3309	0.3033	0.4821	0.4277	0.4312	0.3719	0.4229	0.3498	0.3776
17				0.4283	0.3843	0.5450	0.4107	0.4529	0.3622	0.3640	0.4544	0.4233	0.3831
18		0.0737		0.3404	0.5432	0.4031	0.4617	0.4362	0.4365	0.3842	0.4741	0.4151	0.3338
19		0.2556			0.5582	0.5231	0.4481	0.4488	0.4102	0.4307	0.4345	0.4080	0.4065
20					0.5982	0.6024	0.4443	0.4076	0.3944	0.4618	0.4049	0.4037	0.4071
21		0.5655	0.2951	0.6212	0.5641	0.5769	0.3845	0.4329	0.3795	0.4118	0.4320	0.3947	0.3686
22		0.3866	0.4039	0.4228	0.4986	0.4097	0.4438	0.4415	0.3826	0.4097	0.4049	0.3616	0.2881
23	0.4722	0.3902	0.5514	0.4688	0.4016	0.5528	0.4823	0.4388	0.4475	0.3876	0.3955	0.3907	0.2751
24		0.4102	0.5007	0.5206	0.5081	0.4984	0.4740	0.4535	0.4163	0.3817	0.3964	0.4100	0.3798
25		0.3431	0.6142	0.3174	0.4152	0.4379	0.4667	0.3926	0.4282	0.4027	0.4097	0.3885	0.3882
26		0.4710	0.5160	0.3048	0.4190	0.4351	0.4184	0.4312	0.3975	0.4457	0.4490	0.4240	0.4438
27	0.4476	0.5056	0.3687	0.2606	0.3447	0.4833	0.4272	0.4135	0.4597	0.4696	0.4039	0.3717	0.3359
28	1.0755	0.6534	0.5215	0.3158	0.4329	0.4359	0.4275	0.4139	0.4606	0.4268	0.4303	0.4239	0.3582
29			0.4018	0.4949	0.4644	0.5363	0.3495	0.3685	0.4472	0.4599	0.4483	0.4072	0.4158
30	0.3234	0.8158	0.3921	0.4834	0.3663	0.4063	0.4089	0.4122	0.4135	0.4727	0.4044	0.4172	0.2915
31	0.4421	0.2822	0.4942	0.4498	0.4135	0.4363	0.3871	0.3749	0.4931	0.4020	0.4344	0.3895	0.3187
32		0.3658	0.4111	0.3854	0.3442	0.4199	0.3559	0.3537	0.4093	0.4310	0.4156	0.4478	0.3190
33	0.4237	0.3756	0.5116	0.4911	0.4051	0.4407	0.3632	0.3612	0.3809	0.3919	0.4162	0.4536	0.4742
34	0.3867	0.3882	0.4080	0.3818	0.3613	0.3358	0.3439	0.4202	0.4174	0.3844	0.4382	0.4268	0.4047
35	0.7699	0.5273	0.5189	0.3630	0.3409	0.4616	0.3640	0.3346	0.3627	0.3778	0.3795	0.4320	0.3969
36		0.4300	0.4308	0.5186	0.4020	0.3867	0.3509	0.3192	0.3726	0.3744	0.3707	0.3807	0.3731
37	0.3956	0.3460	0.5125	0.3758	0.4942	0.4042	0.3216	0.3444	0.3808	0.3817	0.3662	0.3864	0.3901
38	0.4893	0.3013	0.4816	0.4121	0.3284	0.3854	0.3517	0.3750	0.3591	0.3177	0.3549	0.3690	0.3870
39			0.3940	0.4254	0.3719	0.4556	0.3103	0.4412	0.3714	0.3256	0.3419	0.3661	0.3956
40	0.2972	0.4967	0.4248	0.5011	0.3432	0.3590	0.3937	0.3308	0.3278	0.3411	0.3409	0.3347	0.3605
41	0.3348		0.4623	0.6228	0.5087	0.4649	0.4374	0.3882	0.3757	0.3490	0.3545	0.3452	0.3518
42		0.3386	0.6079	0.5994	0.3661	0.3342	0.3963	0.3980	0.4391	0.3404	0.3779	0.3346	0.3204
43	0.4388	0.3157	0.4358	0.4676	0.4377	0.3424	0.4134	0.3834	0.3712	0.3799	0.3565	0.3801	0.3544
44		0.3007	0.4090	0.5063	0.4563	0.5899	0.4103	0.3489	0.4116	0.3571	0.3735	0.3644	0.3719
45		0.4266	0.4593	0.2531	0.4565	0.4007	0.3985	0.4552	0.4381	0.3908	0.3810	0.3729	0.4285
46	0.6441	0.5693	0.2085		0.5153	0.4397	0.4548	0.4178	0.3515	0.3904	0.3994	0.3847	0.3570
47	0.4500		0.3851	0.4658	0.4339	0.5362	0.3447	0.4459	0.4787	0.4149	0.4331	0.3752	0.4237
48	0.3083	0.5547	0.5315	0.4575	0.4726	0.3499	0.5628	0.4192	0.4122	0.4016	0.4338	0.4106	0.3887
49			0.4867	0.3709	0.3510	0.4642	0.4906	0.4855	0.4158	0.4393	0.4499	0.4294	0.3718
50			0.2922	0.4557	0.2916	0.4022	0.3645	0.4292	0.4010	0.4223	0.4521	0.4279	0.3982
51	0.1882		0.4614	0.3171	0.3171	0.6725	0.3482	0.4780	0.4157	0.3960	0.4596	0.4263	0.4363
52	0.2690			0.4098	0.4336	0.3596	0.4243	0.4333	0.4443	0.4180	0.4563	0.4296	0.4673
53	0.4495				0.2146	0.4692	0.3261	0.3874	0.4088	0.4426	0.4309	0.4487	0.4307
54				0.3520		0.3312	0.4113	0.4908	0.4603	0.4286	0.4049	0.4243	0.4324
55			0.4226		0.3146	0.5351	0.4539	0.3799	0.3835	0.4192	0.4280	0.3688	0.3771
56			0.3132		0.2155		0.5344	0.3861	0.3845	0.4025	0.4245	0.3594	0.4514
57				0.5968			0.4239	0.2205	0.3430	0.3965	0.4046	0.3781	0.4250
58		0.1847				0.3306	0.2376	0.4017	0.4862	0.3889	0.3369	0.3867	0.4099
59		0.4726		0.7403	0.8217		0.3269	0.5310	0.3923	0.3655	0.3951	0.3319	0.3452
60						0.3300		0.1864	0.3434	0.3388	0.4371	0.3365	0.3304
61							0.2075	0.3290	0.3154	0.3633	0.4174	0.4165	0.4301
62		0.2085			0.4081	0.2579			0.3022	0.4811	0.4401	0.4738	0.6708
63						0.7124	0.2120	0.4625	0.4091	0.3546	0.5249	0.4095	0.3683
64								0.8680		0.3593	0.4629	0.5599	0.5325
65			0.4503						0.2837	0.3850	0.4681	0.5175	0.5320
66					0.1954			0.4402		0.2275	0.4619	0.5424	0.7326
67							0.3013		0.2484	0.4498	0.3762	0.4192	0.4721
68							0.1972	0.6551	0.2236	0.2650	0.4062	0.4710	0.5897
69							0.3837		0.3994	0.3808	0.3901	0.3973	0.3492
70	0.6192						0.1946	0.2883	0.5642	0.3018	0.2163	0.4450	0.3891
71								0.4276	0.5222	0.3718	0.2051	0.4728	0.6930
72						0.1959		0.5086			0.4036	0.4867	0.3729
73									0.4180	0.3559		0.3524	0.5061
74					0.4942					0.5628		0.5000	
75											0.4894	0.3973	0.4198
76								0.4758			0.3039	0.4337	0.2844
77									0.1309		0.4834	0.4760	0.4585
78										0.1577		0.5007	0.5201
79					0.5467			0.1335			0.7587	0.5551	0.7241
80							0.7818				0.1274	0.1692	
81											0.1492	0.3698	0.3216
82												0.1761	0.3780
83											0.1914	0.2177	
84										0.2403	0.2512		
85										0.2936	0.2657		
86										0.3746	0.3266		
87											0.4227	0.5068	

Vklase	5	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
0	0.0930												
1	0.1211												
2	0.2065												
3	0.2330	0.2560											
4	0.3083	0.2217											
5	0.3490	0.2109											
6	0.3515	0.3249	0.2009										
7	0.3535	0.3743	0.2432	0.0886									
8	0.2995	0.3315	0.2799	0.2021									
9	0.4332	0.2923	0.4099	0.2142	0.1271								
10	0.2986	0.2642	0.4168	0.3281	0.2149	0.0854							
11	0.3766	0.3328	0.4026	0.3323	0.2249	0.1662	0.1478						
12	0.4495	0.3805	0.3603	0.3907	0.2659	0.2581	0.1261						
13	0.3923	0.3588	0.4092	0.2800	0.2719	0.2224	0.1522						
14	0.3664	0.4328	0.4307	0.3370	0.3342	0.2210	0.2150	0.1582					
15	0.4342	0.3822	0.3186	0.4502	0.2883	0.2574	0.1990	0.1373					
16	0.3586	0.3468	0.4082	0.3914	0.3624	0.3190	0.2137	0.2510	0.5264				
17	0.3210	0.3271	0.3986	0.3612	0.3094	0.3245	0.2484	0.2373					
18	0.3321	0.3644	0.4229	0.4368	0.3534	0.2388	0.2478	0.2014	0.2789				
19	0.3301	0.3389	0.3886	0.3810	0.4041	0.3617	0.2993	0.2248	0.3479				
20	0.3692	0.3694	0.4153	0.4229	0.4122	0.3737	0.2871	0.2211	0.2025				
21	0.3575	0.3995	0.3682	0.3964	0.4681	0.4035	0.3787	0.2201	0.2923				
22	0.2558	0.4146	0.3522	0.4110	0.4470	0.5412	0.4885	0.4517	0.1603		0.5820		
23	0.2835	0.4039	0.4290	0.4616	0.4000	0.4093	0.4577	0.4060					
24	0.3163	0.4159	0.4239	0.4388	0.4519	0.4324	0.4350	0.4986					
25	0.3974	0.4547	0.4182	0.4239	0.4407	0.4568	0.4103	0.4444	0.3997	0.1862		0.2465	
26	0.4829	0.4679	0.4190	0.4559	0.4671	0.4302	0.4434	0.4444	0.7422				
27	0.3926	0.4582	0.4243	0.4632	0.4387	0.4971	0.4290	0.4123	0.4657				
28	0.3952	0.4307	0.4491	0.4402	0.4462	0.4534	0.4676	0.4263	0.4225	0.3089			
29	0.4595	0.4493	0.4209	0.4739	0.4700	0.4344	0.4052	0.4764	0.4612	0.6712	0.7078		
30	0.3316	0.4470	0.4448	0.4653	0.4342	0.4687	0.4579	0.5481	0.4578				
31	0.3471	0.4153	0.4699	0.4530	0.4502	0.4040	0.4898	0.4374	0.5131	0.7232	0.4873		
32	0.3338	0.4209	0.4597	0.4557	0.4671	0.4865	0.4879	0.4562	0.5251	0.3525		0.1604	
33	0.3949	0.4574	0.4791	0.4686	0.4725	0.4924	0.4781	0.4669	0.5006	0.2269	0.5618	0.6959	
34	0.4193	0.4734	0.4725	0.4243	0.4745	0.4818	0.4757	0.4762	0.4782	0.6219	0.3965	0.8411	
35	0.3896	0.4531	0.4480	0.4623	0.4900	0.4403	0.5260	0.4247	0.5181	0.7549	0.4891		
36	0.3762	0.4441	0.4657	0.4577	0.5249	0.5001	0.5289	0.4714	0.5247	0.6224	0.2459		
37	0.3831	0.4421	0.4341	0.4997	0.4679	0.5232	0.4416	0.5180	0.5152	0.3718	0.6979	0.5781	
38	0.3464	0.3968	0.4461	0.4723	0.4951	0.5135	0.5149	0.5408	0.4946	0.3009	0.6067		
39	0.3623	0.3909	0.4319	0.4385	0.5161	0.5289	0.4869	0.6264	0.5517	0.3931	0.3224	0.6128	
40	0.3622	0.3734	0.4382	0.4817	0.4973	0.4952	0.5149	0.5541	0.3608	0.4986	0.9905	0.6725	
41	0.3518	0.3970	0.4279	0.4743	0.4963	0.5391	0.5387	0.6264	0.5978	0.4065		0.3653	
42	0.3982	0.4091	0.4237	0.4801	0.4834	0.5106	0.5688	0.3752	0.5854	0.8136	0.6106	0.6986	
43	0.4211	0.4138	0.3984	0.4789	0.5072	0.5232	0.5398	0.4978	0.3207	0.4050	0.2696		
44	0.4112	0.3893	0.3943	0.4870	0.4968	0.5285	0.5662	0.5638	0.6971		0.4812		
45	0.3723	0.4031	0.4096	0.4701	0.5124	0.5356	0.6499	0.7353	0.6126	0.4297	0.5746		
46	0.4114	0.4065	0.4131	0.4733	0.5082	0.5334	0.5359	0.5635	0.6053	0.9598	0.4619		
47	0.4117	0.4320	0.3966	0.4453	0.5153	0.5992	0.5972	0.5489	0.4340	0.5536			
48	0.3544	0.4244	0.4251	0.4895	0.5283	0.5497	0.5717	0.7768	0.6294	0.4529			
49	0.3819	0.4284	0.4435	0.5313	0.5671	0.5977	0.6183	0.5115	0.6102				0.5348
50	0.4008	0.4412	0.4697	0.4817	0.5312	0.5945	0.5934	0.6936	0.5120		0.5831	0.7303	
51	0.4360	0.4368	0.4759	0.5013	0.5515	0.6054	0.5627	0.5950	0.7785	0.5859	0.7980		
52	0.4620	0.4824	0.5002	0.5509	0.5399	0.4694	0.6246	0.8001	0.6030	0.6655	0.5703		
53	0.4779	0.4758	0.5043	0.5916	0.5312	0.5269	0.7052	0.6599	0.7412	0.8335			
54	0.4122	0.4656	0.5257	0.5884	0.5652	0.6706	0.7079	0.7095	0.7645	0.8337	0.6220		
55	0.3877	0.4314	0.4825	0.6070	0.6832	0.6376	0.4338	0.5408	0.8311		0.8474		
56	0.4058	0.4394	0.5191	0.5822	0.6518	0.5866	0.5984	1.1241	0.7369		0.4635	0.7456	
57	0.4345	0.4700	0.5508	0.5841	0.6866	0.5756	0.6995	1.2155	0.3745	0.2698	0.8063		
58	0.4521	0.4720	0.5203	0.5577	0.6874	0.8443	0.5862	0.7522	0.2353			0.6123	
59	0.3835	0.4065	0.5391	0.5814	0.6172	0.8485	0.8347			0.7602	1.0722	0.8525	
60	0.3124	0.4130	0.4738	0.6280	0.5569	0.7867	0.2260			0.8697	0.6949	0.9390	
61	0.4009	0.3806	0.5239	0.5425	0.5966	0.5917	0.7703	1.9222	0.6279	0.5522	1.0122	0.6940	
62	0.6733	0.5434	0.6723	0.5257	0.6862	1.0034	0.6561			1.4860			
63	0.3133	0.4322	0.6220	0.7438	0.3960	0.9266	0.5046						0.7500
64	0.5713	0.5087	0.5100	0.3842	0.6830	0.9016		1.0742		1.1253			
65	0.4539	0.3400	0.4700	0.6871	0.8369	0.7469	0.6110		0.8526			0.3901	
66	0.8073	0.5961	0.5628	0.3888		0.8449	0.9419						
67	0.5081	0.3440	0.6173				0.4293	0.5670	1.0161	0.5484			
68	0.3495	0.3790	0.4600	0.4923	0.6219		0.7790			0.8271			
69	0.2633	0.2899	0.7024	0.2582	0.7991	0.9226	0.6062	0.5984	1.1416		0.5514		
70	0.3729	0.3687	0.7981	0.4374	0.4891	0.7833							
71	0.7693	0.7597	0.5997	0.4421	0.3656				0.1748				
72	0.5773	0.5335	0.5786		0.5863			0.7067			1.0514		
73	0.4791	0.5476	0.4376		0.8010					0.6053			
74		0.5859	0.4930						1.0282				0.1829
75		0.4845	0.5039	0.4588									
76	0.6342	0.5763	0.4892	0.5082					1.0043		0.3845		
77		0.4769	0.4322	0.5035							0.4666		
78	0.5255	0.4757	0.4430	0.6879			1.0102		0.4072				
79	0.4891	0.7327	0.6659										
80					0.5436		0.3752						
81	0.3288	0.3270	0.3771		0.5389								
82			0.4235	0.4175									
83					0.4751								
84		0.5134	0.5352										
85				0.5389									
86		0.5387		0.5508	0.5438								
87	0.5569	0.5004											

## Prilog 9. Standardno odstupanje CO u odnosu na brzinu i potrebnu snagu

Vklase	-240	-220	-200	-180	-160	-140	-120	-100	-80	-60	-40	-20	-5
0													0.0965
1													0.1643
2												0.1302	0.1563
3												0.1645	0.1649
4											0.1266	0.1641	0.1583
5											0.1799	0.1507	0.1794
6										0.2812	0.1779	0.1737	0.2347
7										0.1344	0.1602	0.1953	0.1163
8									0.0794	0.1704	0.1724	0.1398	0.1939
9									0.1130	0.2093	0.1735	0.1777	0.1708
10									0.1490	0.1707	0.1928	0.1583	0.1473
11									0.1459	0.1908	0.1551	0.1557	0.1452
12									0.2029	0.1770	0.1479	0.1799	0.2166
13									0.2045	0.1736	0.1708	0.1651	0.1924
14						0.0073			0.0621	0.1657	0.1963	0.1905	0.1888
15			0.1072		0.1691	0.2065	0.2128	0.2302	0.1775	0.1599	0.2075	0.2055	0.2008
16					0.1499	0.1446	0.1939	0.2101	0.1591	0.1669	0.1725	0.1883	0.2033
17					0.0778	0.1123	0.1436	0.1813	0.1601	0.1690	0.1899	0.1972	0.1799
18						0.1733	0.1967	0.1601	0.1996	0.2087	0.2085	0.1778	0.1525
19					0.0258	0.1167	0.1975	0.1420	0.1853	0.1365	0.1793	0.1903	0.1708
20					0.1421	0.1841	0.1825	0.1578	0.2044	0.2068	0.1735	0.2035	0.2475
21				0.3390	0.4329	0.2662	0.1512	0.1649	0.1620	0.1904	0.2031	0.1753	0.2473
22			0.2582	0.0972	0.1684	0.1420	0.1163	0.2099	0.1792	0.1620	0.1409	0.1833	0.1862
23			0.2008	0.1930	0.1866	0.1770	0.1617	0.1831	0.1704	0.1694	0.1502	0.1777	0.1877
24			0.1170	0.2289	0.0940	0.1991	0.1879	0.1993	0.1728	0.1522	0.1624	0.1944	0.2373
25		0.1237	0.3207	0.1121	0.1550	0.1468	0.1646	0.1581	0.1370	0.1654	0.1678	0.1507	0.1756
26			0.1674	0.1047	0.1574	0.1610	0.1818	0.1788	0.1681	0.1953	0.1513	0.1687	0.1471
27	0.0233	0.0888	0.0357	0.0627	0.1163	0.1632	0.1538	0.1728	0.1481	0.1937	0.1729	0.1657	0.2210
28		0.2550	0.0947	0.0831	0.1148	0.1712	0.1649	0.1388	0.1443	0.1823	0.1925	0.1733	0.2032
29				0.2482	0.1454	0.1661	0.1402	0.1379	0.1884	0.1837	0.2089	0.2008	0.2184
30	0.3306		0.1417	0.1713	0.1547	0.1098	0.1588	0.1743	0.1781	0.1849	0.1766	0.1875	0.1798
31	0.1167	0.0906	0.1833	0.1722	0.1297	0.1559	0.1450	0.1242	0.1682	0.1351	0.1637	0.2039	0.1912
32			0.1243	0.1469	0.0988	0.1434	0.1678	0.1254	0.1656	0.1653	0.1722	0.1962	0.2112
33		0.0130	0.0483	0.2450	0.1016	0.1784	0.1887	0.1762	0.1364	0.1542	0.1568	0.1926	0.1808
34			0.1624	0.0046	0.0979	0.1137	0.1179	0.1255	0.1405	0.1156	0.1678	0.1643	0.1404
35		0.0733	0.0647	0.0647	0.1180	0.1112	0.1284	0.1370	0.1425	0.1650	0.1428	0.1726	0.1825
36		0.0090	0.1485	0.1887	0.1506	0.1433	0.1826	0.1002	0.1338	0.1270	0.1562	0.1496	0.1738
37	0.0622	0.1430	0.0667	0.1483	0.2070	0.1944	0.1526	0.1402	0.1222	0.1395	0.1436	0.1603	0.1599
38	0.1996		0.3754	0.1263	0.0863	0.1651	0.1071	0.1631	0.1103	0.1311	0.1233	0.1442	0.1714
39			0.1573	0.0909	0.1322	0.2464	0.0966	0.1233	0.1269	0.1091	0.1304	0.1592	0.1737
40			0.1352	0.1136	0.0990	0.1114	0.1230	0.1143	0.1527	0.1201	0.1193	0.1452	0.1791
41	0.1258		0.1153	0.0062	0.2284	0.1828	0.1513	0.1138	0.1417	0.1471	0.1240	0.1378	0.2162
42			0.1860		0.1666	0.1797	0.1599	0.1700	0.1311	0.1161	0.1330	0.1307	0.1553
43			0.1688	0.1744	0.2038	0.0757	0.1634	0.1562	0.1232	0.1563	0.1240	0.1774	0.1596
44		0.0001	0.0708	0.2934	0.1213	0.2095	0.1489	0.1061	0.1311	0.1455	0.1385	0.1382	0.1545
45		0.0149	0.2608		0.1677	0.1568	0.1435	0.2275	0.1471	0.1492	0.1322	0.1556	0.1645
46		0.0148	0.0574			0.1088	0.1060	0.0942	0.1110	0.1212	0.1583	0.1574	0.1414
47			0.1569	0.1921	0.2598	0.1689	0.1141	0.1562	0.1512	0.1477	0.1639	0.1659	0.1500
48				0.0535	0.0890	0.0022	0.0748	0.1145	0.1267	0.1247	0.1456	0.1709	0.1964
49				0.0712	0.1187	0.2047	0.1253	0.1310	0.1403	0.1449	0.1678	0.1641	0.1433
50				0.2528	0.1490	0.0940	0.1179	0.1450	0.1280	0.1463	0.1508	0.1569	0.1368
51			0.0718	0.0936		0.1151	0.0235	0.1228	0.1312	0.1125	0.1714	0.1589	0.1290
52					0.1635		0.1196	0.0933	0.1160	0.1202	0.1489	0.1313	0.1273
53					0.0777		0.0317	0.1252	0.1382	0.1493	0.1349	0.1394	0.1429
54							0.0264	0.1122	0.1625	0.1209	0.1203	0.1472	0.1401
55					0.0508		0.0716	0.1196	0.1457	0.1292	0.1517	0.1324	0.1344
56								0.2145	0.0938	0.1483	0.1516	0.1678	0.2386
57								0.1157	0.1596	0.1435	0.1435	0.1350	0.1606
58						0.1430	0.0710	0.1985	0.2452	0.1138	0.1103	0.1661	0.1659
59					0.8546		0.1546		0.2699	0.0896	0.1519	0.1032	0.0796
60									0.0815	0.1166	0.1592	0.1037	0.1069
61							0.0301	0.1492	0.1045	0.1530	0.1762	0.1487	0.1559
62									0.1075	0.2776	0.1151	0.2975	0.4141
63								0.3318	0.2098	0.1544	0.1705	0.1196	0.1109
64										0.1570	0.2209	0.1750	0.2269
65									0.0720	0.2588	0.2752	0.2494	0.2179
66								0.2837		0.0032	0.2779	0.2438	0.2297
67										0.3184	0.2070	0.1561	0.1042
68										0.0443	0.1804	0.1687	0.1090
69										0.2238	0.1146	0.1561	0.1381
70												0.1801	0.1415
71									0.1078		0.0074	0.0147	0.2067
72								0.0302			0.3619	0.0952	0.1201
73									0.2741	0.2433		0.1403	0.2418
74													
75											0.1903	0.1180	0.2452
76											0.1905	0.1449	0.1157
77												0.1859	0.1967
78												0.0553	0.0535
79												0.0793	0.2525
80													
81												0.0071	0.0242
82											0.0121		
83												0.0007	
84													
85													
86													
87													

Vklase	5	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
0	0.0764												
1	0.1191												
2	0.1451												
3	0.1582	0.0942											
4	0.1605	0.1373											
5	0.1693	0.1464											
6	0.1871	0.1755	0.1383										
7	0.2059	0.2185	0.1788	0.0367									
8	0.1646	0.1857	0.1673	0.1160									
9	0.1939	0.1778	0.1703	0.1282	0.0312								
10	0.1095	0.1577	0.2006	0.1787	0.1505								
11	0.1716	0.2093	0.2180	0.1948	0.1176	0.1107							
12	0.2074	0.1662	0.1948	0.2033	0.1789	0.1654	0.0275						
13	0.1633	0.2113	0.2058	0.1373	0.1510	0.1764	0.0430						
14	0.1613	0.1684	0.2192	0.1625	0.1820	0.1139	0.1131						
15	0.1831	0.1797	0.1709	0.1947	0.1481	0.1842	0.1391	0.0328					
16	0.1980	0.1693	0.1882	0.1935	0.1779	0.1931	0.1373	0.1693					
17	0.1913	0.1830	0.1969	0.1847	0.1720	0.1747	0.1493	0.1928					
18	0.1534	0.2012	0.1931	0.2074	0.1902	0.1649	0.1815	0.1020	0.2023				
19	0.1825	0.1714	0.1807	0.1833	0.2063	0.2197	0.1898	0.1412	0.1681				
20	0.1706	0.1747	0.2037	0.1874	0.1835	0.1695	0.1952	0.1104	0.0433				
21	0.2263	0.1861	0.1774	0.2021	0.1753	0.2108	0.2392		0.2213				
22	0.1866	0.1746	0.1697	0.2194	0.2138	0.1774	0.2938		0.0474				
23	0.1949	0.1741	0.1608	0.2191	0.1937	0.1440	0.1791	0.2470					
24	0.2402	0.1886	0.1886	0.1600	0.2061	0.1914	0.1997	0.2768					
25	0.1824	0.1860	0.1858	0.1834	0.1945	0.1843	0.2220	0.1809					
26	0.1541	0.1563	0.1613	0.2109	0.1717	0.1944	0.1870	0.1885					
27	0.2628	0.1721	0.1665	0.1806	0.1907	0.1651	0.1890	0.2156	0.2012				
28	0.2061	0.1765	0.1556	0.1636	0.2004	0.1658	0.2187	0.1850	0.2475				
29	0.2592	0.1886	0.1759	0.1907	0.1528	0.1736	0.1902	0.1909	0.2596	0.1739			
30	0.2281	0.1674	0.1919	0.1843	0.1602	0.1825	0.2003	0.1545	0.2145				
31	0.2059	0.2004	0.1564	0.1989	0.1804	0.1501	0.1727	0.1796	0.1811	0.1349	0.3504		
32	0.2013	0.1778	0.1579	0.1851	0.1722	0.2311	0.1928	0.1933	0.2265	0.1843			
33	0.2047	0.1698	0.1996	0.1537	0.1703	0.1726	0.1783	0.1948	0.2410		0.2345		
34	0.1639	0.1953	0.1706	0.1596	0.1568	0.2605	0.1775	0.1970	0.2050	0.2341	0.2912		
35	0.2053	0.1749	0.1686	0.1528	0.1902	0.1409	0.2019	0.1875	0.2024		0.2697		
36	0.1865	0.1896	0.1725	0.1480	0.1861	0.1953	0.2271	0.1654	0.2379	0.1636			
37	0.1475	0.1539	0.1681	0.1792	0.1879	0.1747	0.2010	0.2169	0.2737	0.0858	0.2608		
38	0.1664	0.1537	0.1565	0.1547	0.1622	0.1647	0.1998	0.2258	0.2122	0.0437	0.2681		
39	0.1768	0.1572	0.1529	0.1536	0.1569	0.1829	0.1778	0.1535	0.1638	0.0738			
40	0.1717	0.1609	0.1551	0.1565	0.1788	0.1942	0.2562	0.2054	0.0878	0.1773			
41	0.1688	0.1656	0.1790	0.1591	0.1765	0.1924	0.1848	0.2197	0.1519	0.0321			
42	0.1678	0.1577	0.1873	0.1518	0.1871	0.1731	0.1631	0.0523	0.2245			0.5871	
43	0.1324	0.1527	0.1273	0.1647	0.1548	0.1681	0.2467	0.0380	0.2144	0.0837			
44	0.1480	0.1460	0.1391	0.1645	0.1647	0.2021	0.1484	0.2401	0.4087				
45	0.1007	0.1266	0.1578	0.1483	0.1538	0.1626	0.2447	0.2210	0.1412				
46	0.1555	0.1429	0.1325	0.1457	0.1606	0.1676	0.1998	0.1882	0.2157				
47	0.1355	0.1239	0.1236	0.1419	0.1637	0.1653	0.1302	0.3582	0.1303				
48	0.1508	0.1653	0.1279	0.1695	0.1836	0.1717	0.2197	0.3168	0.1678	0.0764			
49	0.1499	0.1548	0.1297	0.1507	0.1506	0.2288	0.1800	0.0863		0.4742			0.3938
50	0.1624	0.1552	0.1502	0.1510	0.1831	0.2420	0.2003	0.1866	0.1260				0.2431
51	0.1582	0.1386	0.1532	0.1607	0.1992	0.1501	0.1511	0.1120	0.3686	0.0674			
52	0.1397	0.1850	0.2006	0.1670	0.1435	0.1657	0.1361	0.3463	0.3010		0.0288		
53	0.1412	0.1404	0.1353	0.2672	0.1248	0.1940	0.2560	0.2770	0.2598	0.0955			
54	0.1266	0.1870	0.1670	0.1514	0.1592	0.2745	0.2097	0.2824			0.4965		
55	0.1423	0.1701	0.1724	0.1730	0.1731	0.2295	0.0408	0.1146	0.3019				
56	0.2191	0.1541	0.1422	0.2171	0.1619	0.2556	0.1496	0.6171				0.1138	
57	0.1938	0.2204	0.1395	0.1691	0.2205	0.3256	0.1706		0.0375		0.1783		
58	0.1587	0.1890	0.2009	0.2164	0.2021	0.7251	0.1985	0.2259					
59	0.0788	0.1396	0.1748	0.1276	0.2384	0.6317	0.1669						
60	0.1096	0.1520	0.1745	0.1490	0.3019	0.3222				0.1546			
61	0.1532	0.1200	0.2136	0.1874	0.2068		0.3326						
62	0.2658	0.1890	0.4267	0.2048	0.2584	0.1984	0.5037						
63	0.0606	0.1161	0.1524	0.3351	0.1938	0.0647	0.0922						
64	0.1710	0.2358	0.1978	0.1570						0.8244			
65	0.3360	0.0895	0.3033	0.2377			0.0827						
66	0.1910	0.2571	0.2640			0.0303	0.0248						
67	0.1709	0.0968	0.3210							0.5867			
68	0.1181	0.1063	0.1602	0.2675	0.4651								
69	0.0226	0.0357	0.2889		0.0052								
70	0.1706	0.1295	0.2125			0.1674							
71	0.1105	0.3015	0.3488		0.1147								
72	0.3205	0.2423	0.2272		0.2760								
73	0.2571	0.2154	0.1002										
74		0.0803	0.0772										
75		0.0100											
76	0.1220	0.1155		0.0147									
77		0.0880											
78	0.0770	0.0448	0.0922	0.4512									
79	0.0263	0.2122	0.4674										
80													
81		0.0122	0.0349										
82			0.0481										
83													
84													
85													
86													
87		0.0433											



## Prilog 10. Broj izmerenih vrednosti CO u odnosu na brzine i ubrzanja

Vklase	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0,5
0							1	8	20	43	92	203	6214
1	1				1		15	10	41	47	56	74	235
2				2	3	3	9	16	40	37	33	54	44
3					2	4	14	25	41	24	25	40	32
4	1		1	1	5	9	13	29	16	21	21	39	14
5			1	1	6	11	13	27	29	21	13	22	12
6		1	1	2	2	12	17	27	24	18	18	19	32
7			1	3	5	5	20	21	28	15	16	24	6
8	1	1		3	3	8	14	16	23	14	21	11	12
9			1	1	6	12	18	25	26	18	19	29	10
10	1			3		7	16	24	33	20	15	27	11
11				3	1	11	25	22	26	15	17	25	10
12		1		2	4	9	17	21	34	16	16	29	18
13			1	1	6	13	12	25	31	15	13	28	18
14		3		1	1	8	12	27	31	26	27	36	17
15		1	1	3	3	5	16	31	29	22	18	46	26
16			1	5	2	11	19	21	28	26	28	48	27
17		1	2	7	2	10	19	30	46	22	33	68	37
18		1	1	1	3	7	19	25	34	34	46	60	58
19		1		1	4	8	17	25	35	35	35	73	45
20					4	10	16	24	38	23	43	80	50
21			1	1	5	4	19	37	41	42	36	86	90
22			2	2	5	10	14	27	36	44	43	72	95
23		1		3	5	11	9	22	36	38	29	82	71
24				2	1	7	10	23	49	41	50	106	83
25				1	4	6	15	26	46	39	53	87	47
26			1	1	1	3	20	28	39	49	59	73	47
27			1	2	2	4	10	25	32	43	46	103	51
28	1			1	4	5	9	21	33	65	49	110	90
29						1	8	21	37	36	65	110	86
30					2	4	5	13	34	46	74	111	98
31				1	3	4	12	22	42	49	64	129	113
32					1	1	9	22	31	44	74	122	96
33					2	2	6	13	36	38	62	146	110
34				1		1	9	11	20	36	62	144	93
35		1				2	7	10	24	41	64	164	104
36				1	2		5	9	22	41	71	176	126
37						2	6	6	19	38	68	185	143
38						1	2	9	16	32	85	162	141
39						2		7	20	22	64	185	126
40						2	1	4	22	28	64	199	127
41				1		2	3	5	17	18	72	178	140
42							1	4	3	27	45	184	125
43							2	4	12	28	44	182	106
44					1	2		4	15	18	58	188	98
45							1	4	4	17	33	188	151
46						1		4	1	12	51	193	139
47							1	1	7	9	45	177	136
48						2		2	6	8	33	200	182
49							1		4	6	39	191	190
50						1			3	8	25	175	169
51							1	1	2	5	22	164	175
52								1		4	18	163	167
53								1	1	3	15	145	141
54									1	14	128	134	
55									1	3	11	113	163
56										2	8	99	145
57								1		1	5	80	159
58									1	2	6	57	119
59		1							1	3	4	40	71
60						1	1				2	38	89
61											3	26	49
62									1	1	1	12	36
63											3	19	24
64											1	12	14
65										1		11	16
66											2	5	25
67											1	8	26
68											2	8	16
69						1					1	8	23
70										1	1	4	15
71												6	7
72											1	4	7
73								1				4	8
74											1	1	1
75									1			2	7
76												2	13
77												1	10
78												1	15
79											1	2	13
80												3	
81												1	5
82												1	2
83												1	2
84												2	
85												1	1
86												1	1
87													2

Vklase	0_5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	4993										
1	257	150									
2	23	38	78								
3	18	19	24	32							
4	9	17	17	20	43						
5	7	14	11	13	27	42					
6	10	9	7	10	11	13	22				
7	3	8	6	6	5	16	30	16			
8	6	8	8	5	11	7	10	25	3		
9	8	9	6	6	7	8	16	24	9		
10	9	14	7	4	8	10	21	18	13	4	
11	10	14	11	11	14	7	20	19	10	10	1
12	7	16	15	12	13	14	24	23	18	5	3
13	6	21	12	10	13	13	14	19	17	8	
14	15	20	18	14	23	19	15	15	9	4	
15	22	44	25	18	20	22	14	13	7	3	1
16	26	50	36	27	33	18	15	9	14	4	1
17	31	61	48	35	27	37	18	11	6	2	
18	51	85	71	33	25	12	20	9	7	3	
19	32	83	73	53	24	18	13	13	6		
20	48	86	89	52	40	16	6	11	4		
21	67	78	65	69	42	18	2	3	1		
22	91	78	52	63	33	16	1	2		1	
23	85	67	56	69	65	17	6				
24	43	53	70	57	67	31	3				
25	51	81	47	74	69	34	7	1	1		
26	41	77	58	59	43	26	7				
27	59	58	76	68	51	27	9				
28	63	81	59	71	67	36	6				
29	76	92	58	68	62	39	4	1			
30	84	79	69	70	54	29	1				
31	97	92	82	75	55	22	4	2			
32	93	131	80	61	63	22	2	1			
33	93	138	91	61	57	23	3	1			
34	104	156	86	62	40	21	4				
35	101	147	120	60	24	9	1				
36	119	172	123	57	34	10	1				
37	131	169	114	51	23	6	2			1	
38	131	173	115	46	27	4					
39	132	177	130	54	11	3	1				
40	121	159	122	39	18	3	1				
41	119	165	111	57	7	1	1				
42	107	158	109	49	9	4					
43	87	152	103	38	5						
44	102	148	116	45	3	1	1				
45	114	145	90	25	4	1					
46	178	152	114	25	2						
47	120	152	76	22	4			1			
48	174	154	73	19	3						
49	165	155	73	15	3	2					
50	135	160	61	17	1	2					
51	119	146	56	11	3						
52	138	138	52	11	3						
53	120	132	27	11		1			1		
54	98	135	40	4	2						
55	170	118	16	5	1		1				
56	113	96	20	5	2						
57	160	92	16	5	1			1			
58	102	73	10	1	1						
59	63	47	9	2	1		1				
60	78	34	4	2	2	1					
61	46	29	5	3	1	1					
62	30	19	4	1							
63	27	13	5		1						
64	14	11	2	2							
65	5	9	5	1							
66	15	7	2				1				
67	11	5	4	1					1		
68	20	8	1	1							
69	11	9	3	1							
70	24	8	1								
71	6	5	1								
72	14	5	1	1							
73	10	3	1								
74	3	3	1	1							
75	3	1									
76	9	3	1	1							
77	4	1		1							
78	10	4	1								
79	6	1									
80		1	1								
81	5	2					1				
82	2	1									
83		1									
84	2										
85		1									
86	1	2									
87	3	1									

## Prilog 11. Prosečne izmerene vrednosti CO u odnosu na brzine i ubrzanja

Vklas	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0,5
0							0.3773	0.2294	0.3268	0.3004	0.2536	0.2308	0.0969
1	0.3673				0.6106		0.3319	0.3264	0.2734	0.2994	0.2545	0.2746	0.1094
2				0.3908	0.3710	0.2787	0.4045	0.2799	0.3133	0.2533	0.2768	0.2948	0.1919
3					0.6162	0.2860	0.3186	0.2868	0.3291	0.3264	0.3279	0.2973	0.2931
4	0.4683		0.4806	0.5050	0.3421	0.3729	0.4103	0.3434	0.2679	0.3179	0.3047	0.3120	0.3812
5			0.4439	0.5860	0.2930	0.4338	0.3666	0.2963	0.3249	0.3525	0.3133	0.3220	0.3469
6		0.3601	0.1750	0.5503	0.2778	0.3473	0.4046	0.3571	0.3229	0.3912	0.3172	0.3321	0.2232
7			0.3661	0.3603	0.4519	0.3214	0.3254	0.3819	0.3370	0.3514	0.2538	0.2438	0.2511
8	0.2247	0.4613		0.4582	0.3923	0.3048	0.4127	0.2582	0.2866	0.3924	0.3405	0.3374	0.3707
9			0.5345	0.0925	0.3328	0.3814	0.3651	0.3574	0.3689	0.3450	0.3876	0.3766	0.3047
10	0.3974			0.4171		0.3699	0.4161	0.3722	0.3269	0.3067	0.3373	0.3627	0.3852
11				0.4795	0.6778	0.4359	0.4200	0.3065	0.3956	0.4408	0.3057	0.3699	0.4241
12		0.4540		0.4687	0.4347	0.5538	0.3941	0.3508	0.3517	0.3626	0.4183	0.3820	0.3672
13			0.1554	0.7124	0.3900	0.4707	0.3874	0.3991	0.3387	0.3746	0.3498	0.3473	0.3538
14		0.5139		0.3257	0.4406	0.5226	0.4345	0.4375	0.3854	0.4257	0.4061	0.3739	0.3042
15		0.4539	0.2148	0.6556	0.5260	0.5044	0.4078	0.3499	0.3612	0.4181	0.3758	0.3657	0.3375
16			0.2249	0.3300	0.5739	0.3825	0.4629	0.4431	0.3664	0.4143	0.3733	0.3426	0.4037
17		0.4283	0.3918	0.4754	0.4600	0.4115	0.4358	0.3910	0.3552	0.4151	0.4747	0.4080	0.3737
18		0.0737	0.3404	0.5432	0.3875	0.4047	0.4842	0.4374	0.3682	0.4437	0.4625	0.4009	0.3358
19		0.2556		0.5654	0.4931	0.4971	0.4910	0.4323	0.4017	0.4474	0.4401	0.3996	0.4057
20					0.5982	0.5388	0.4501	0.4089	0.3944	0.4529	0.4157	0.3997	0.4071
21			0.5655	0.2951	0.5983	0.5716	0.4027	0.4277	0.3949	0.3923	0.4485	0.3941	0.3669
22			0.3894	0.4097	0.3957	0.5399	0.3565	0.4201	0.4034	0.4138	0.4063	0.3705	0.2940
23		0.4722		0.4876	0.4205	0.4697	0.5436	0.4504	0.4434	0.4328	0.3922	0.3905	0.2850
24				0.4969	0.4180	0.5132	0.4404	0.4929	0.4449	0.3983	0.3874	0.4046	0.3931
25				0.4306	0.4241	0.3765	0.4327	0.4574	0.4006	0.4082	0.4241	0.3878	0.3870
26			0.5606	0.4710	0.6344	0.3357	0.3992	0.4746	0.4003	0.4268	0.4457	0.4197	0.4474
27			0.3369	0.4476	0.5056	0.2978	0.3430	0.4438	0.4342	0.4525	0.4382	0.3783	0.3501
28	0.4456			0.5443	0.7589	0.4772	0.4288	0.4697	0.3773	0.4535	0.4296	0.4264	0.3667
29						0.4018	0.4820	0.5065	0.3601	0.3932	0.4553	0.4405	0.3942
30					0.3234	0.5399	0.4317	0.4047	0.3972	0.4150	0.4474	0.4186	0.3275
31			0.2864		0.3842	0.4206	0.4347	0.4241	0.4091	0.4194	0.4378	0.4185	0.3326
32				0.6068	0.3658	0.3991	0.3528	0.3888	0.3848	0.4253	0.4250	0.3656	
33				0.4008	0.4042	0.5249	0.3958	0.4138	0.3505	0.3876	0.4319	0.4705	
34				0.5024		0.3867	0.4058	0.3542	0.3564	0.4014	0.3986	0.4235	0.4218
35		0.1985				0.5477	0.5225	0.3494	0.3886	0.3649	0.3642	0.4031	0.4139
36				0.4321	0.8137		0.4305	0.5274	0.3631	0.3432	0.3710	0.3779	0.3738
37						0.3436	0.3765	0.4342	0.4421	0.3255	0.3876	0.3738	0.3881
38						0.3482	0.4659	0.4353	0.3708	0.3770	0.3347	0.3543	0.3861
39						0.4296		0.3895	0.3831	0.3806	0.3709	0.3409	0.3869
40						0.3932	0.2972	0.4835	0.3548	0.3789	0.3242	0.3390	0.3576
41				0.4021		0.4153	0.3676	0.4952	0.5193	0.3875	0.3680	0.3544	0.3470
42						0.4445	0.5385	0.3281	0.4108	0.3694	0.3627	0.3263	
43							0.3566	0.4058	0.4595	0.3838	0.3879	0.3703	0.3550
44					0.4461	0.5788		0.3742	0.4647	0.4702	0.3785	0.3643	0.3726
45							0.2208	0.3886	0.4857	0.3998	0.4413	0.3802	0.4065
46						0.3417		0.4876	0.2490	0.4550	0.3754	0.4042	0.3567
47							0.4063	0.4500	0.4615	0.3943	0.4622	0.4219	0.3906
48						0.3081		0.4315	0.4699	0.4537	0.4179	0.4285	0.3910
49							0.9540		0.3998	0.4659	0.4443	0.4398	0.3998
50						0.5043			0.4012	0.3651	0.4168	0.4456	0.4041
51							0.6732	0.1882	0.4614	0.5304	0.4302	0.4324	0.4361
52								0.2690	0.4461	0.4091	0.4461	0.4426	0.4475
53								0.2449	0.4495	0.2994	0.3806	0.4358	0.4407
54										0.3520	0.4364	0.4081	0.4370
55									0.4226	0.3881	0.3843	0.4238	0.3692
56										0.2643	0.3946	0.4173	0.4001
57								0.2993		0.5968	0.2978	0.4031	0.3984
58									0.1847	0.3306	0.3103	0.3645	0.4015
59		0.5078							0.4726	0.7945	0.5141	0.3710	0.3372
60						0.2133	0.8283				0.2582	0.3986	0.3334
61											0.2129	0.3860	0.4246
62										0.2085	0.4081	0.2579	0.5394
63											0.3841	0.4497	0.3872
64											0.8680	0.4197	0.5403
65										0.4503		0.3784	0.5229
66											0.4181	0.2582	0.6403
67											0.3013	0.3786	0.4437
68											0.4261	0.3158	0.4885
69						0.1803					0.3837	0.3889	0.3743
70										0.6192		0.3427	0.4264
71												0.3756	0.5672
72											0.1959	0.3516	0.5020
73								0.4187				0.3870	0.4292
74											0.4942	0.5628	0.5000
75									0.8608			0.4467	0.4422
76												0.4572	0.3789
77												0.1309	0.4697
78												0.1577	0.5084
79											0.5467	0.4461	0.6721
80												0.3595	
81												0.1492	0.3485
82												0.1675	0.2813
83												0.1914	0.2177
84												0.2458	
85												0.2936	0.2657
86												0.3746	0.3266
87													0.4647

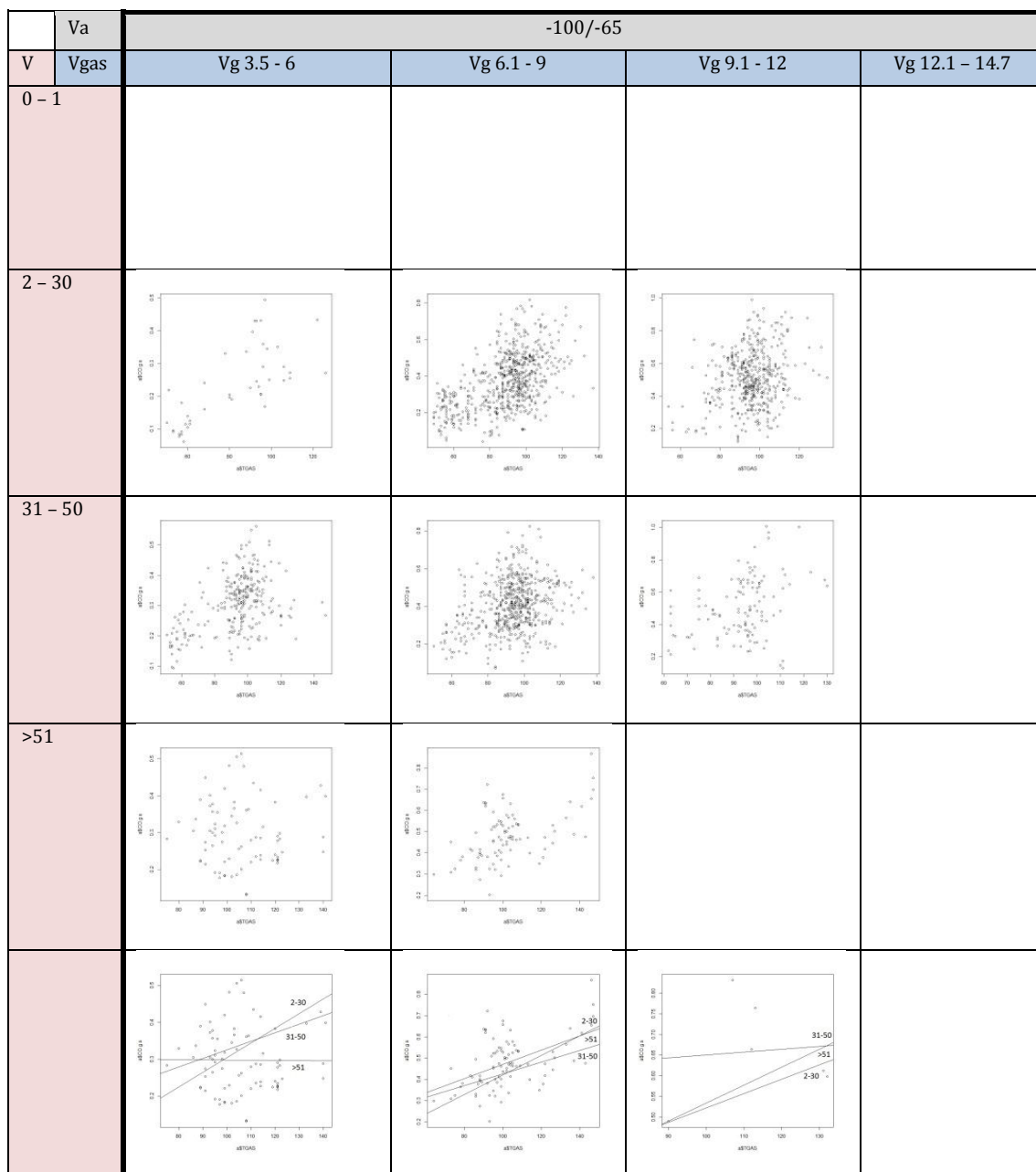
Vklase	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0930										
1	0,1020	0,1538									
2	0,1957	0,2339	0,1963								
3	0,2227	0,2876	0,2507	0,1966							
4	0,3601	0,2817	0,3075	0,2317	0,2170						
5	0,2882	0,3427	0,4132	0,2549	0,2136	0,1745					
6	0,3930	0,3096	0,3617	0,4543	0,2136	0,1818	0,2080				
7	0,2391	0,3964	0,2716	0,4238	0,4382	0,3186	0,2221	0,1397			
8	0,3228	0,3259	0,3295	0,2462	0,3664	0,2939	0,2629	0,1830	0,1476		
9	0,3980	0,4167	0,2891	0,2734	0,4028	0,4496	0,2205	0,2354	0,1337		
10	0,3001	0,3036	0,2102	0,3067	0,4786	0,3282	0,3259	0,3035	0,2009	0,1193	
11	0,3394	0,3339	0,3738	0,4128	0,3953	0,3358	0,2893	0,2408	0,2112	0,1501	0,1478
12	0,4247	0,4128	0,3943	0,4109	0,2798	0,4228	0,3176	0,2714	0,2449	0,2441	0,1261
13	0,4478	0,3514	0,4054	0,3683	0,3720	0,2797	0,2760	0,2670	0,1798	0,1372	
14	0,3449	0,4563	0,4027	0,4613	0,3544	0,2984	0,3449	0,2147	0,2200	0,2192	
15	0,3833	0,3868	0,4269	0,3564	0,4713	0,2896	0,2437	0,3013	0,1310	0,1580	0,1077
16	0,3737	0,3366	0,4114	0,3732	0,4050	0,3484	0,2880	0,3562	0,2229	0,1946	0,5264
17	0,3215	0,3208	0,3822	0,4012	0,3310	0,3301	0,2809	0,2589	0,2713	0,0914	
18	0,3297	0,3537	0,4248	0,4038	0,3873	0,3469	0,2460	0,2013	0,2139	0,3090	
19	0,3184	0,3424	0,3819	0,3933	0,3898	0,3838	0,3168	0,2534	0,2845		
20	0,3684	0,3752	0,4116	0,4248	0,4013	0,3737	0,3484	0,2056	0,2025		
21	0,3588	0,4018	0,3690	0,4038	0,4552	0,4461	0,1711	0,3085	0,1713		
22	0,2583	0,4264	0,3492	0,4142	0,4921	0,5283	0,4517	0,1603		0,5820	
23	0,2979	0,4141	0,4187	0,4446	0,3988	0,4382	0,4060				
24	0,3299	0,4075	0,4274	0,4385	0,4606	0,4201	0,4986				
25	0,3938	0,4495	0,4107	0,4433	0,4547	0,3979	0,5079	0,1862	0,2465		
26	0,4802	0,4549	0,4536	0,4482	0,4509	0,4062	0,5410				
27	0,4102	0,4277	0,4625	0,4622	0,4631	0,4188	0,4359				
28	0,3836	0,4453	0,4509	0,4512	0,4484	0,4513	0,4426				
29	0,4459	0,4459	0,4575	0,4556	0,4299	0,4529	0,6555	0,7078			
30	0,3583	0,4382	0,4638	0,4512	0,4722	0,5145	0,5345				
31	0,3528	0,4504	0,4479	0,4486	0,4739	0,4529	0,7232	0,4873			
32	0,3638	0,4406	0,4571	0,4776	0,4693	0,4879	0,4711	0,1604			
33	0,4166	0,4677	0,4728	0,4760	0,4773	0,4914	0,5618	0,6959			
34	0,4317	0,4784	0,4538	0,4710	0,4713	0,5238	0,5077				
35	0,4022	0,4627	0,4785	0,4698	0,4869	0,5439	0,2985				
36	0,3773	0,4757	0,4850	0,5087	0,5122	0,5463	0,2459				
37	0,4152	0,4393	0,4904	0,4788	0,5338	0,4560	0,7263			0,2805	
38	0,3609	0,4433	0,4900	0,5093	0,5035	0,4538					
39	0,3646	0,4272	0,4870	0,5248	0,5712	0,3944	0,6128				
40	0,3613	0,4224	0,5066	0,4980	0,5350	0,5965	0,6725				
41	0,3623	0,4307	0,5055	0,5584	0,5609	0,3838	0,3653				
42	0,3885	0,4441	0,4889	0,5333	0,5854	0,7054					
43	0,4164	0,4221	0,5099	0,5421	0,3442						
44	0,3759	0,4327	0,5132	0,5595	0,7957	0,4812	0,4928				
45	0,3888	0,4226	0,5297	0,6571	0,5995	0,5746					
46	0,4114	0,4200	0,5268	0,5561	0,7108						
47	0,4219	0,4165	0,5506	0,5803	0,4398			0,4243			
48	0,3860	0,4560	0,5349	0,6900	0,4529						
49	0,4012	0,4738	0,5945	0,5453	0,6102	0,5348					
50	0,4186	0,4718	0,5730	0,5893	0,5831	0,7303					
51	0,4283	0,4894	0,5751	0,6717	0,6393						
52	0,4624	0,5295	0,5504	0,6746	0,6021						
53	0,4758	0,5382	0,5749	0,7496		0,5558			0,6341		
54	0,4432	0,5439	0,6128	0,8358	0,6220						
55	0,4079	0,5368	0,5777	0,6569	0,8474		0,3533				
56	0,4247	0,5404	0,6401	0,9529	0,7456						
57	0,4518	0,5556	0,6966	0,5829	0,9324			0,5025			
58	0,4673	0,5441	0,7485	0,2353	0,6123						
59	0,4004	0,5527	0,8439	0,9162	0,8525		0,2375				
60	0,3692	0,5207	0,6465	0,8697	0,8169	0,3420					
61	0,3899	0,5473	0,9650	0,7307	0,6940	0,2908					
62	0,5997	0,6345	0,8861	1,4860							
63	0,4014	0,6109	0,7642		0,7500						
64	0,5217	0,5093	0,9879	1,1253							
65	0,4083	0,6073	0,6865	0,3901							
66	0,7265	0,6059	0,9419				0,7633				
67	0,4484	0,6173	0,7571	0,5484					0,2129		
68	0,3737	0,5237	0,7790	0,8271							
69	0,2778	0,6990	0,7821	0,5514							
70	0,3858	0,6974	0,6649								
71	0,7629	0,4745	0,1748								
72	0,5429	0,5817	0,7067	1,0514							
73	0,4969	0,5858	0,6053								
74	0,5923	0,4557	1,0282	0,1829							
75	0,4909	0,4588									
76	0,6020	0,5019	1,0043	0,3845							
77	0,4657	0,5035		0,4666							
78	0,4948	0,6807	0,4072								
79	0,5447	0,9964									
80		0,5436	0,3752								
81	0,3423	0,4457					0,8484				
82	0,4235	0,4175									
83		0,4751									
84	0,5243										
85		0,5389									
86	0,5387	0,5473									
87	0,5192	0,5548									

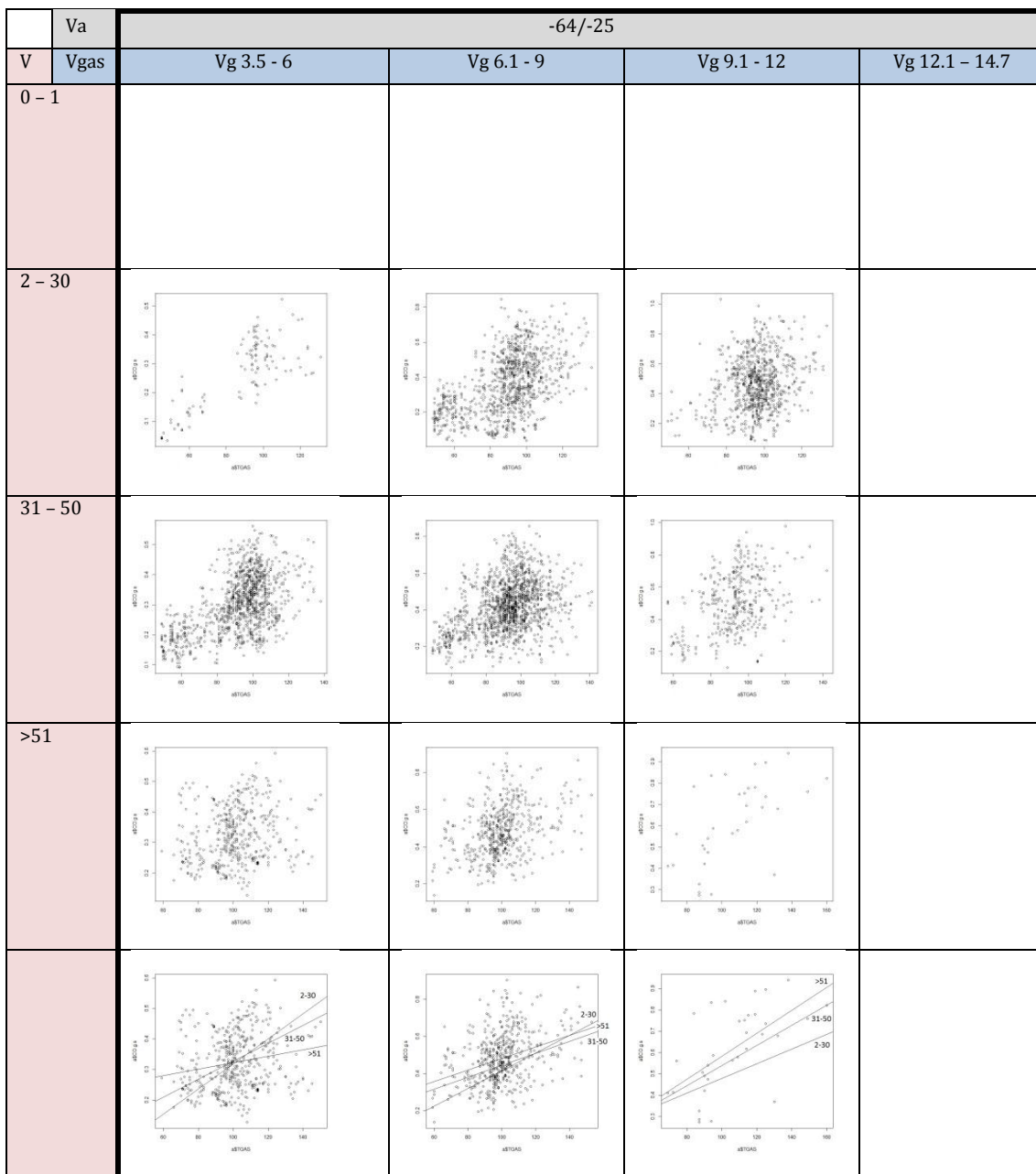
## Prilog 12. Standardna odstupanja vrednosti CO u odnosu na brzine i ubrzanja

Vklase	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0.5
0						0.1200	0.1613	0.1538	0.1350	0.1607	0.0845
1					0.1557	0.1899	0.1304	0.1713	0.1351	0.1696	0.1193
2		0.0771	0.0623	0.0783	0.1519	0.1931	0.1708	0.1284	0.1389	0.1325	0.1560
3			0.2688	0.0937	0.1604	0.1562	0.1581	0.1549	0.1590	0.1593	0.1930
4			0.1291	0.1771	0.1655	0.1747	0.1184	0.1775	0.1154	0.1697	0.1480
5			0.2093	0.1827	0.1290	0.1520	0.1128	0.1915	0.1677	0.2032	0.1527
6		0.3744	0.0761	0.1941	0.1862	0.1499	0.1698	0.2051	0.1737	0.2493	0.2196
7		0.1474	0.1142	0.1686	0.1638	0.1616	0.1838	0.2558	0.1426	0.1166	0.0894
8		0.0972	0.1054	0.1766	0.1239	0.1625	0.1827	0.1236	0.1387	0.2261	0.1678
9			0.0736	0.2088	0.2097	0.1823	0.1751	0.1821	0.1872	0.1589	0.1754
10		0.0291		0.1331	0.1999	0.1615	0.2038	0.2084	0.1457	0.1295	0.1425
11		0.1310		0.1860	0.1423	0.1554	0.1500	0.1584	0.1472	0.1368	0.2039
12		0.0642	0.2250	0.1733	0.1691	0.1561	0.1838	0.1550	0.2397	0.1918	0.1520
13			0.2168	0.1578	0.2031	0.1779	0.1538	0.1909	0.1862	0.1816	0.1738
14				0.0636	0.1615	0.1780	0.2029	0.1948	0.2024	0.1875	0.2095
15		0.2065	0.2128	0.2667	0.1360	0.1810	0.1669	0.2004	0.2240	0.1962	0.2037
16		0.1387	0.0538	0.1826	0.2101	0.1558	0.1869	0.1625	0.1688	0.1993	0.1909
17	0.0078	0.1527	0.0158	0.1513	0.1816	0.1534	0.1827	0.1608	0.2002	0.1849	0.1853
18			0.2087	0.1672	0.1822	0.1689	0.2013	0.2163	0.2042	0.1697	0.1573
19			0.0797	0.1840	0.1836	0.1290	0.1877	0.1277	0.1955	0.1796	0.1788
20			0.1421	0.1835	0.1926	0.1611	0.2044	0.2065	0.1787	0.2012	0.2475
21			0.3245	0.3335	0.1677	0.1597	0.1724	0.1821	0.1914	0.1780	0.2442
22	0.0040	0.3649	0.1037	0.1328	0.0742	0.1735	0.2049	0.1651	0.1483	0.1737	0.1886
23		0.2162	0.1731	0.1900	0.1796	0.1704	0.1945	0.1399	0.1731	0.1702	0.1914
24		0.1225		0.1751	0.1366	0.2063	0.2001	0.1584	0.1656	0.1800	0.2331
25			0.2877	0.0996	0.1676	0.1513	0.1587	0.1425	0.1643	0.1542	0.1732
26				0.0914	0.1493	0.1602	0.1811	0.1878	0.1727	0.1628	0.1453
27		0.0233	0.0888	0.0864	0.1098	0.1615	0.1787	0.1466	0.1814	0.1607	0.2297
28			0.2965	0.1286	0.1098	0.1739	0.1325	0.1450	0.1782	0.1793	0.2052
29					0.1873	0.1569	0.1391	0.1576	0.1908	0.2064	0.2141
30			0.3306	0.2035	0.1882	0.1213	0.1482	0.1928	0.1715	0.1770	0.1996
31			0.1299	0.2449	0.1620	0.1534	0.1408	0.1467	0.1690	0.1715	0.2042
32					0.1399	0.1214	0.1606	0.1585	0.1695	0.1832	0.2134
33			0.0598	0.0275	0.1130	0.1100	0.1913	0.1699	0.1438	0.1620	0.1984
34					0.1521	0.0940	0.1149	0.1416	0.1115	0.1650	0.1550
35				0.3141	0.0625	0.0956	0.1205	0.1554	0.1427	0.1549	0.1881
36			0.3033		0.1051	0.1785	0.1392	0.1529	0.1314	0.1471	0.1705
37				0.0113	0.1204	0.1463	0.1994	0.1444	0.1383	0.1446	0.1626
38					0.2328	0.2154	0.1550	0.1250	0.1271	0.1343	0.1612
39				0.1631		0.1289	0.1270	0.1895	0.1253	0.1330	0.1705
40				0.2272		0.1098	0.1013	0.1192	0.1312	0.1281	0.1694
41				0.0525	0.1055	0.1242	0.1980	0.1396	0.1409	0.1363	0.1839
42						0.1711	0.1349	0.1891	0.1260	0.1281	0.1454
43					0.1163	0.1503	0.1893	0.1416	0.1488	0.1392	0.1672
44				0.1171		0.0869	0.1869	0.1866	0.1247	0.1393	0.1489
45						0.0768	0.2140	0.1412	0.1564	0.1429	0.1625
46						0.2162		0.1034	0.1089	0.1530	0.1407
47							0.1767	0.1967	0.1466	0.1606	0.1583
48				0.0409		0.1742	0.0566	0.0890	0.1284	0.1458	0.1809
49							0.0821	0.1482	0.1313	0.1623	0.1548
50							0.2021	0.1061	0.1400	0.1558	0.1385
51							0.0718	0.2162	0.1288	0.1576	0.1444
52								0.1007	0.1038	0.1391	0.1298
53								0.1569	0.1504	0.1325	0.1441
54									0.1091	0.1253	0.1448
55								0.1323	0.1123	0.1408	0.1331
56								0.0691	0.1920	0.1540	0.2049
57									0.0986	0.1491	0.1481
58								0.1430	0.1649	0.1315	0.1667
59								0.6061	0.2722	0.1255	0.0942
60									0.1015	0.1484	0.1048
61									0.0232	0.1560	0.1516
62										0.1951	0.3478
63									0.2844	0.1875	0.1144
64										0.1960	0.2071
65										0.2109	0.2306
66									0.3150	0.0597	0.2499
67										0.2070	0.1348
68									0.3238	0.1448	0.1622
69										0.1212	0.1465
70										0.1524	0.1653
71										0.1520	0.1680
72										0.1821	0.1722
73										0.2146	0.2006
74											
75										0.2998	0.1430
76										0.0263	0.1562
77											0.1684
78											0.0535
79										0.4421	0.2251
80										0.3664	
81											0.0277
82											0.1368
83											0.0007
84										0.0077	
85											
86											
87											0.0595

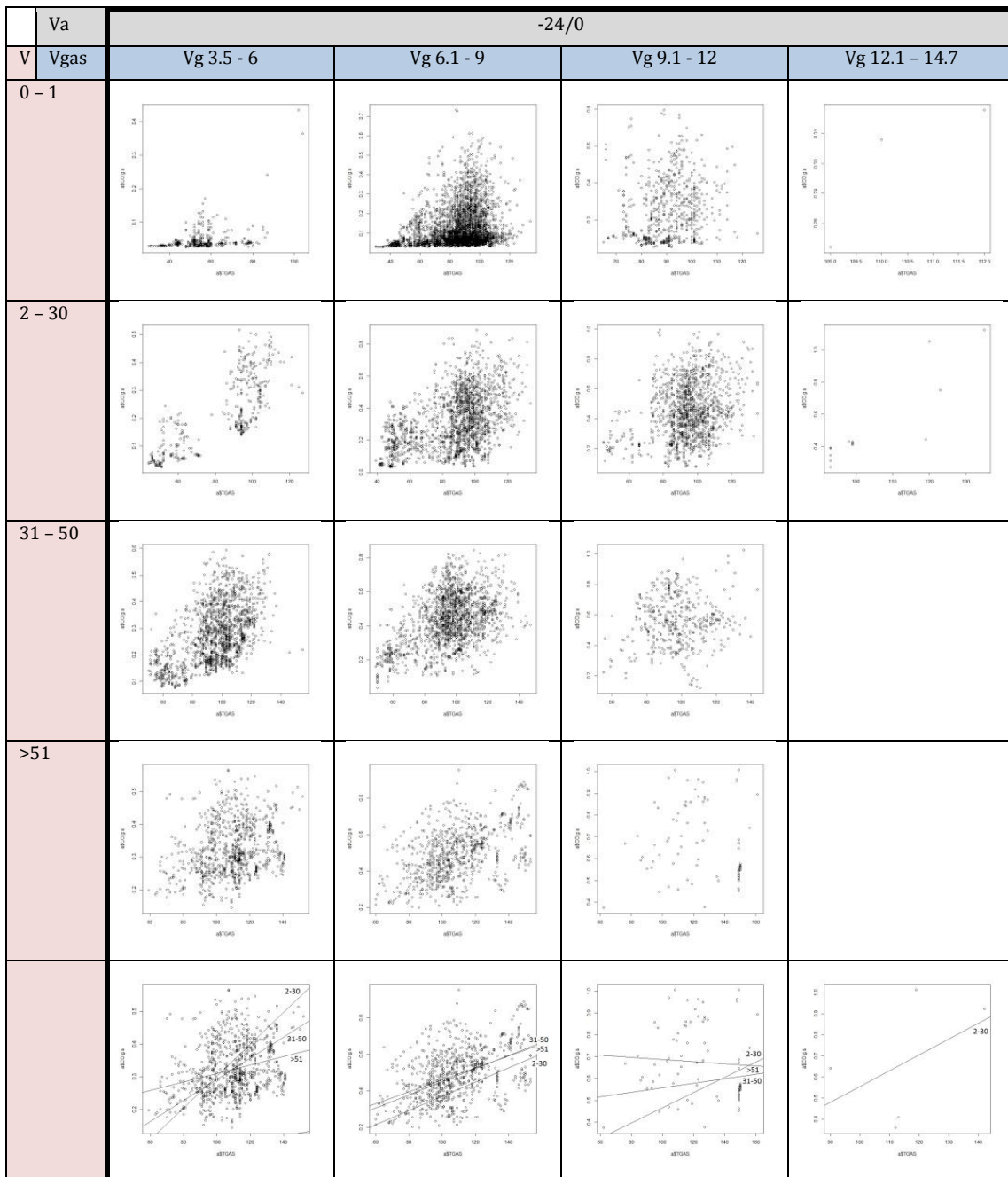
Vklase	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.0764										
1	0.1039	0.1355									
2	0.1405	0.1416	0.1481								
3	0.1596	0.1562	0.1705	0.1352							
4	0.2039	0.0988	0.1867	0.1449	0.1352						
5	0.1689	0.1424	0.1787	0.1575	0.1396	0.1332					
6	0.2127	0.1671	0.0796	0.1786	0.1255	0.1270	0.1424				
7	0.1995	0.2037	0.1838	0.1473	0.3114	0.2049	0.1545	0.1422			
8	0.1299	0.2167	0.1639	0.2005	0.1772	0.1785	0.1415	0.1021	0.0676		
9	0.1667	0.2198	0.1843	0.2009	0.1396	0.2104	0.1225	0.1409	0.0366		
10	0.1344	0.1593	0.1061	0.1129	0.2311	0.1951	0.1784	0.1594	0.1518	0.0240	
11	0.1571	0.2283	0.1899	0.2160	0.2173	0.2274	0.1822	0.1138	0.1457	0.0892	
12	0.1742	0.1873	0.1717	0.2139	0.1784	0.1645	0.2074	0.1837	0.1698	0.1606	0.0275
13	0.1815	0.2163	0.1753	0.2221	0.1574	0.1540	0.1718	0.1956	0.0821	0.0433	
14	0.1581	0.1462	0.1888	0.2259	0.1658	0.1458	0.2045	0.1171	0.0929	0.1476	
15	0.1816	0.1875	0.1801	0.1900	0.1863	0.1517	0.1086	0.2089	0.0157	0.0229	
16	0.2028	0.1687	0.1872	0.1710	0.2075	0.1689	0.1948	0.1866	0.1245	0.1706	
17	0.1832	0.1875	0.1845	0.2107	0.1795	0.1672	0.1654	0.1640	0.1903	0.0126	
18	0.1490	0.1925	0.2057	0.1932	0.2090	0.1597	0.2044	0.1055	0.0925	0.2365	
19	0.1787	0.1756	0.1710	0.1974	0.1973	0.1982	0.2289	0.1249	0.1810		
20	0.1723	0.1753	0.2035	0.1905	0.1771	0.1695	0.2177	0.0962	0.0433		
21	0.2249	0.1844	0.1813	0.1970	0.1875	0.2089	0.0060	0.2095			
22	0.1832	0.1769	0.1762	0.2214	0.1993	0.1758		0.0474			
23	0.1983	0.1757	0.1754	0.2235	0.1601	0.1565	0.2470				
24	0.2446	0.1704	0.1888	0.1744	0.2022	0.1964	0.2768				
25	0.1833	0.1868	0.1846	0.1855	0.1889	0.2026	0.2088				
26	0.1433	0.1623	0.1986	0.1751	0.1862	0.1891	0.2105				
27	0.2477	0.1623	0.1822	0.1815	0.1752	0.2195	0.1887				
28	0.1939	0.1676	0.1674	0.1925	0.1834	0.2157	0.2617				
29	0.2439	0.1855	0.1820	0.1678	0.1872	0.2079	0.1455				
30	0.2240	0.1692	0.1835	0.1711	0.1938	0.1873					
31	0.1995	0.1856	0.1878	0.1661	0.1852	0.1617	0.1349	0.3504			
32	0.2109	0.1596	0.1841	0.2082	0.1856	0.2307	0.2119				
33	0.1950	0.1838	0.1640	0.1718	0.1866	0.2324	0.2345				
34	0.1860	0.1754	0.1615	0.2204	0.1730	0.2327	0.3255				
35	0.1866	0.1750	0.1734	0.1683	0.2288	0.1923					
36	0.1867	0.1755	0.1649	0.2079	0.1880	0.2193					
37	0.1622	0.1622	0.1785	0.1950	0.2347	0.1872	0.2097				
38	0.1586	0.1577	0.1621	0.1833	0.2122	0.2362					
39	0.1688	0.1543	0.1606	0.1818	0.1814	0.0718					
40	0.1654	0.1590	0.1730	0.2214	0.1890	0.3441					
41	0.1699	0.1705	0.1751	0.1998	0.1813						
42	0.1534	0.1736	0.1750	0.1751	0.2245	0.3490					
43	0.1413	0.1487	0.1612	0.2157	0.1295						
44	0.1454	0.1501	0.1787	0.1872	0.4383						
45	0.1138	0.1497	0.1764	0.2124	0.1587						
46	0.1457	0.1389	0.1707	0.1756	0.3521						
47	0.1309	0.1251	0.1658	0.2784	0.1364						
48	0.1655	0.1500	0.1775	0.2754	0.0764						
49	0.1545	0.1438	0.1948	0.1085	0.4742	0.3938					
50	0.1650	0.1458	0.2114	0.1662		0.2431					
51	0.1506	0.1598	0.1639	0.2293	0.1463						
52	0.1352	0.2069	0.1457	0.3166	0.0586						
53	0.1393	0.1951	0.2288	0.1927							
54	0.1664	0.1724	0.2220	0.0512	0.4965						
55	0.1512	0.1990	0.1910	0.2337							
56	0.1777	0.1754	0.2030	0.6216	0.1138						
57	0.2051	0.1775	0.1992	0.3860							
58	0.1767	0.2131	0.5118								
59	0.1279	0.1793	0.5064	0.2206							
60	0.1445	0.2039	0.3845	0.1546	0.1726						
61	0.1350	0.1952	0.5896	0.2466							
62	0.2307	0.3161	0.3949								
63	0.1163	0.2670	0.2472								
64	0.2058	0.1986	0.1221	0.8244							
65	0.2497	0.2736	0.1246								
66	0.2245	0.2734	0.0248								
67	0.1649	0.3210	0.4553								
68	0.1251	0.2747									
69	0.0322	0.2735	0.3114								
70	0.1629	0.2505									
71	0.2388	0.2185									
72	0.2476	0.2118									
73	0.2029	0.1926									
74	0.0579	0.0239									
75	0.0133										
76	0.1149	0.0151									
77	0.0752										
78	0.0522	0.3789									
79	0.1845										
80											
81	0.0344	0.1318									
82	0.0481										
83											
84	0.0154										
85											
86		0.0049									
87	0.0448										

**Prilog 13. Zavisnost emisije CO od temperature gasa po klasama brzina, potrebne snage i brzine izduvnog gasa u uslovima usporenja**

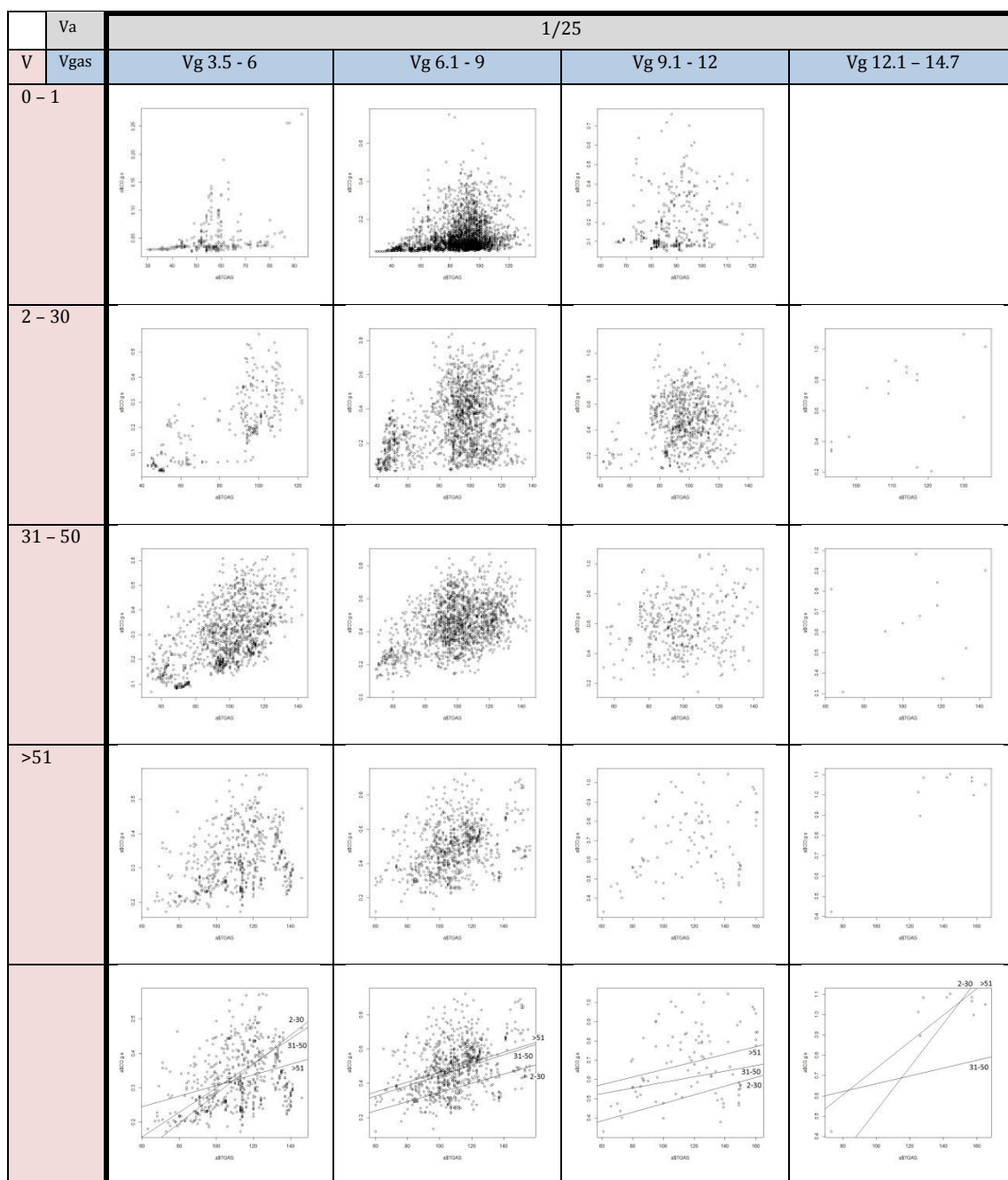


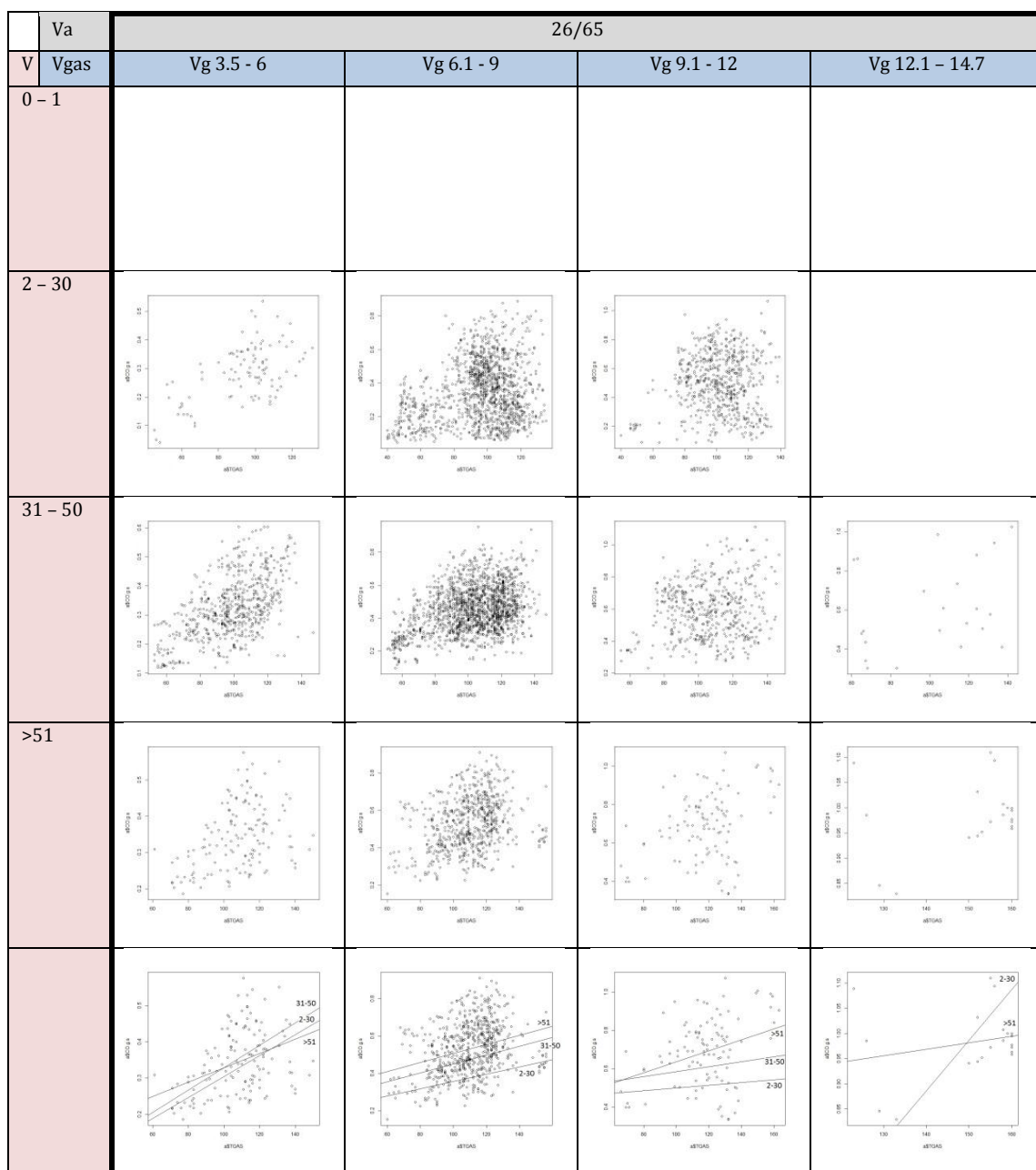


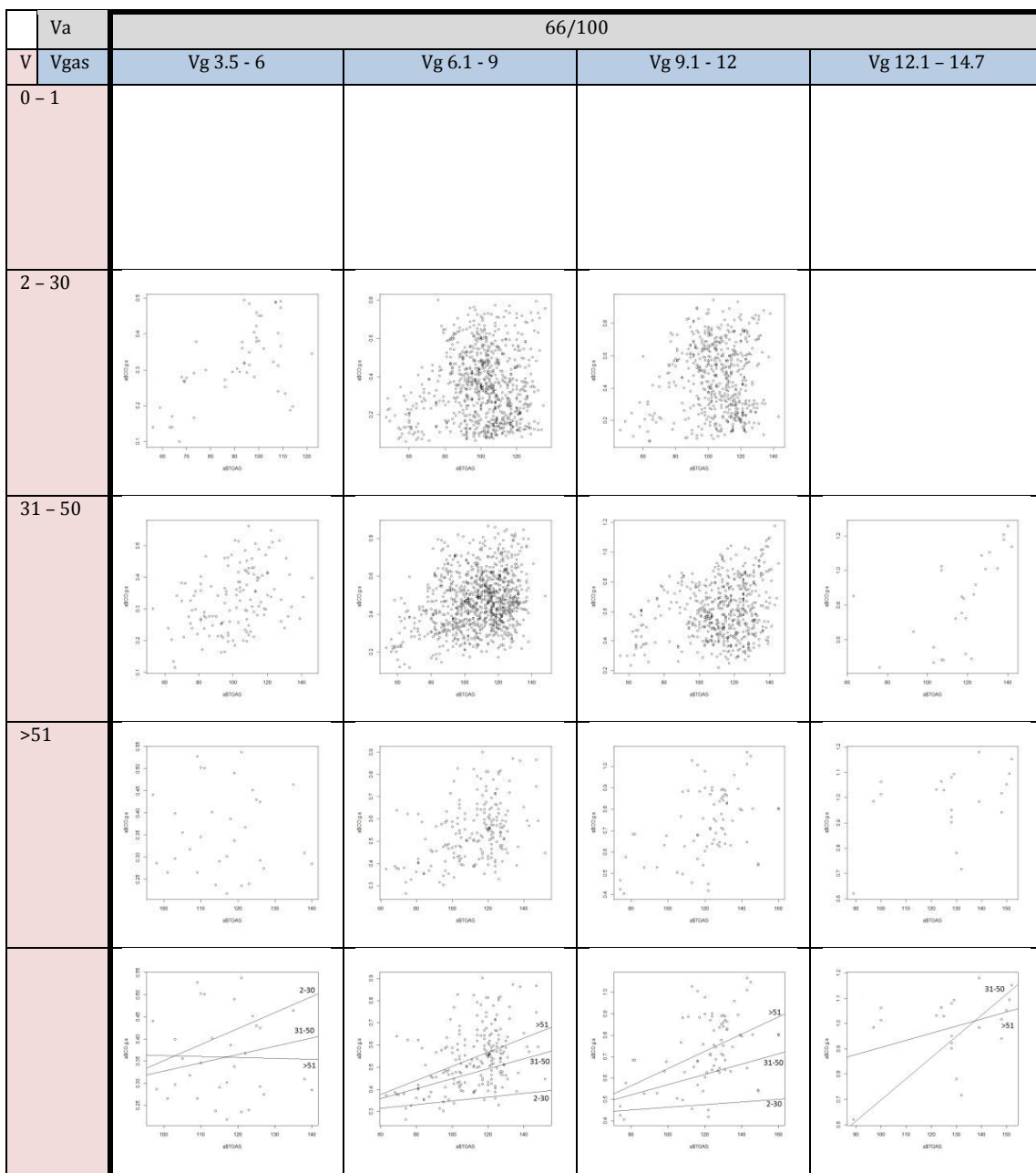




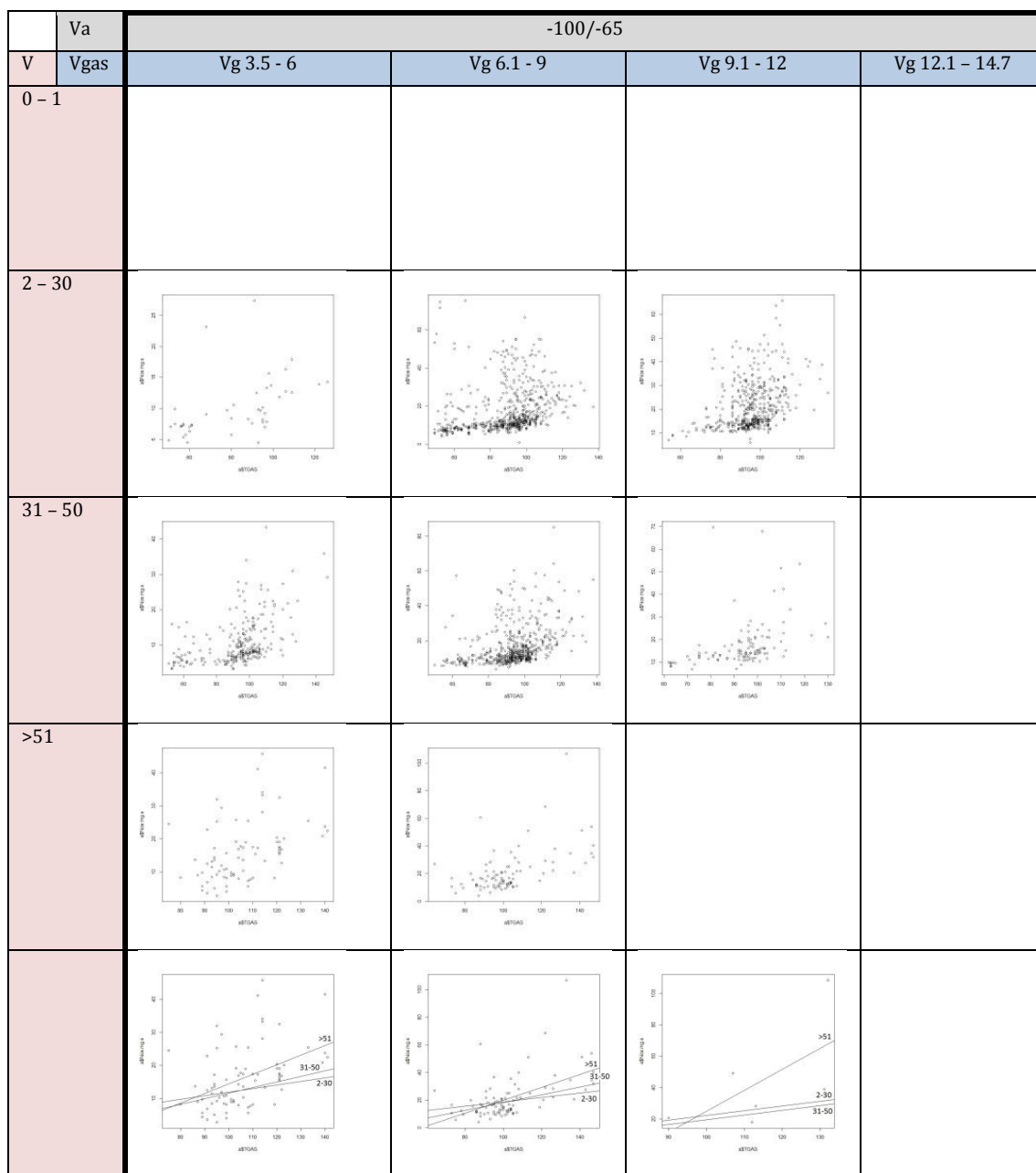
**Prilog 14. Zavisnost emisije CO od temperature gasa po klasama brzina, potrebne snage i brzine izduvnog gasa u uslovima ubrzanja**

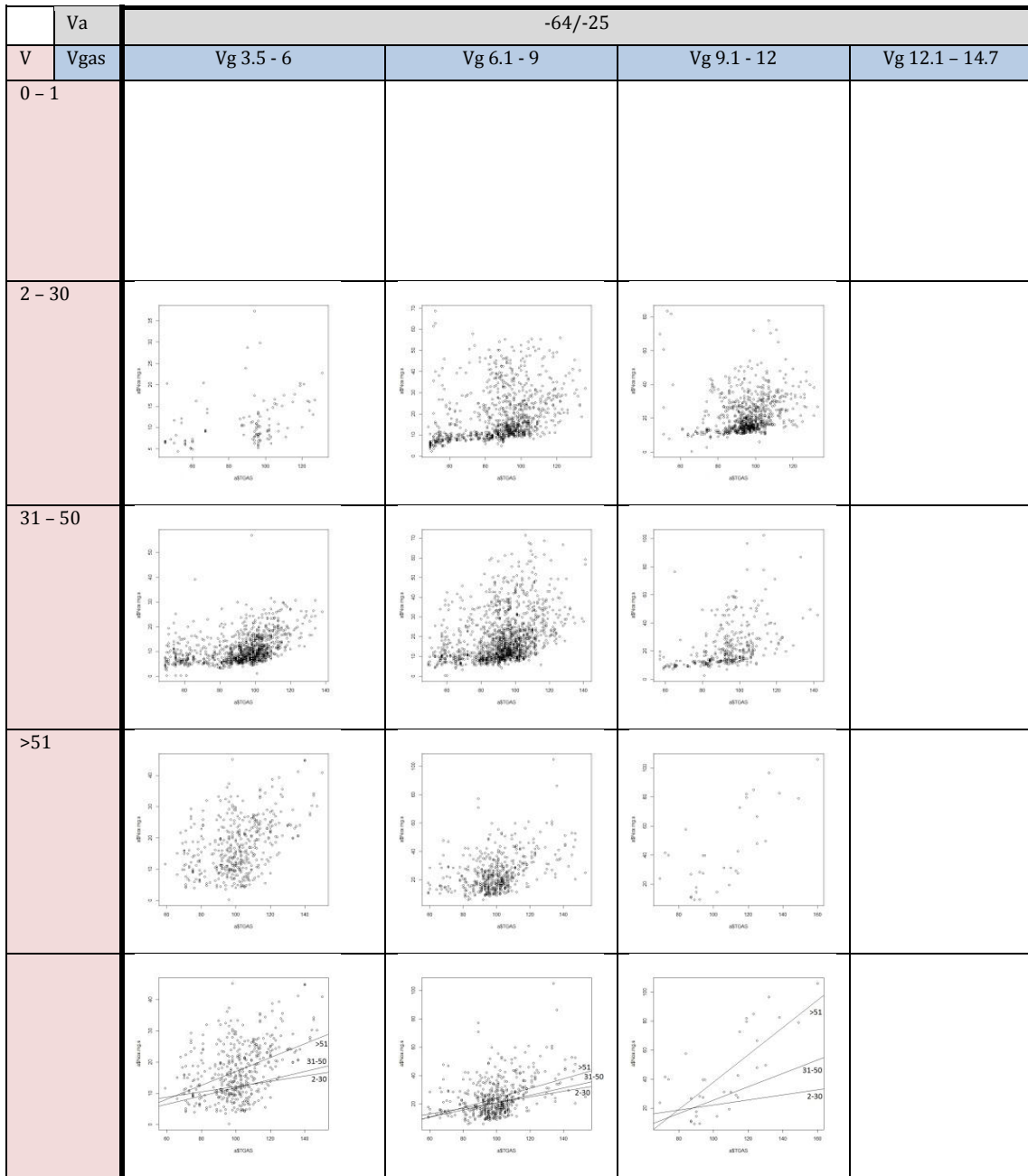


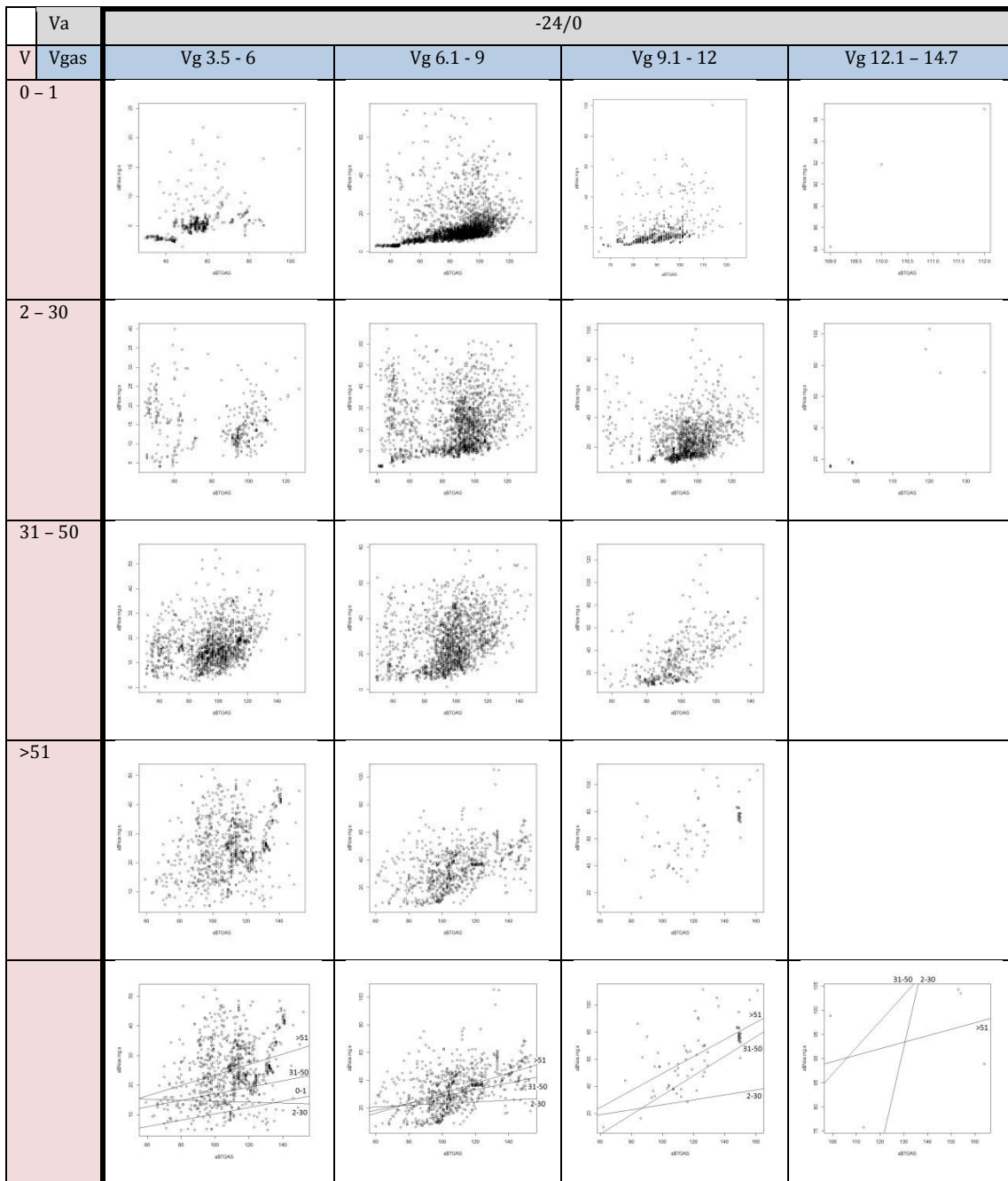




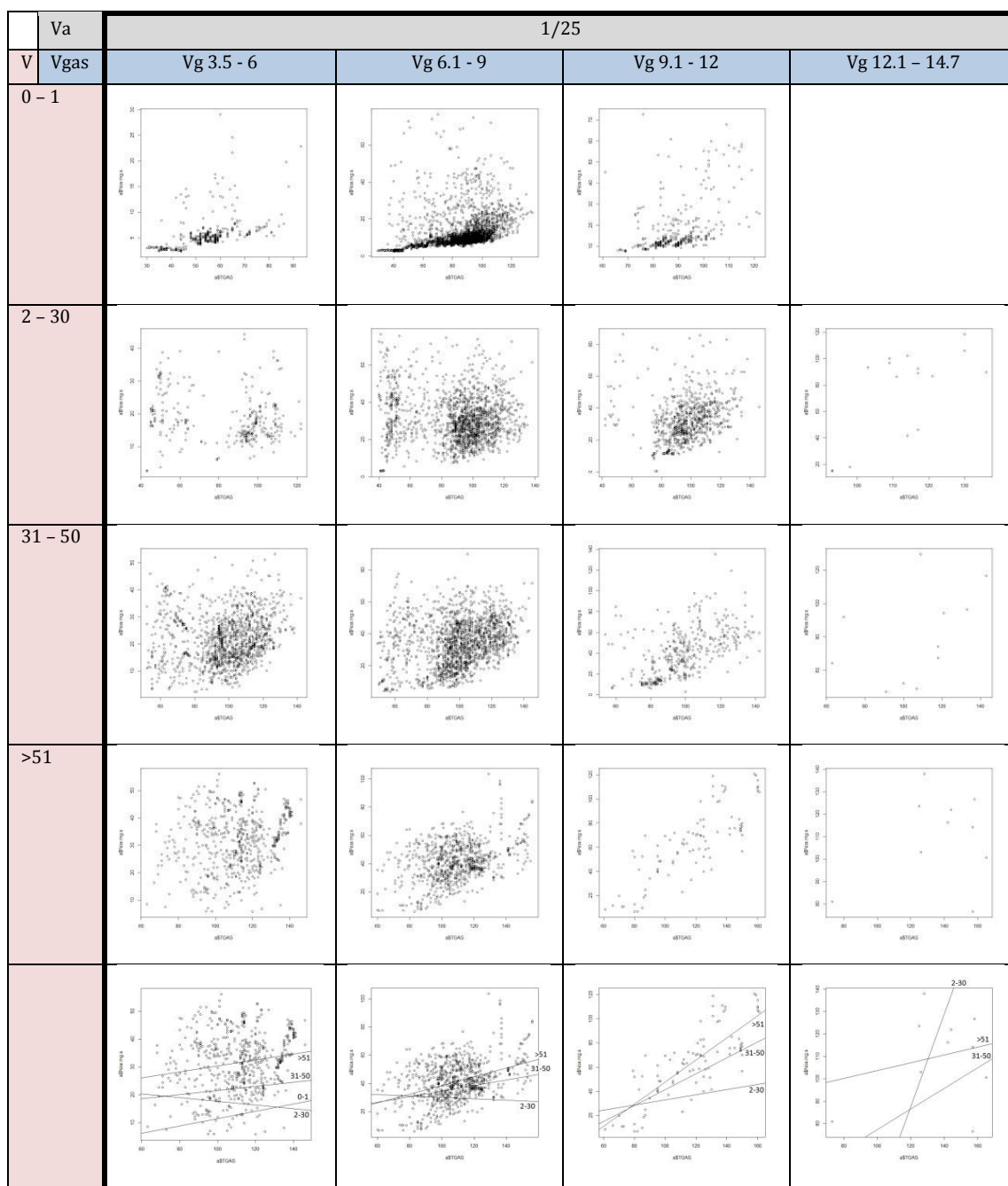
**Prilog 15. Zavisnost emisije NOx od temperature gasa po klasama brzina, potrebne snage i brzine izduvnog gasa u uslovima usporenja**



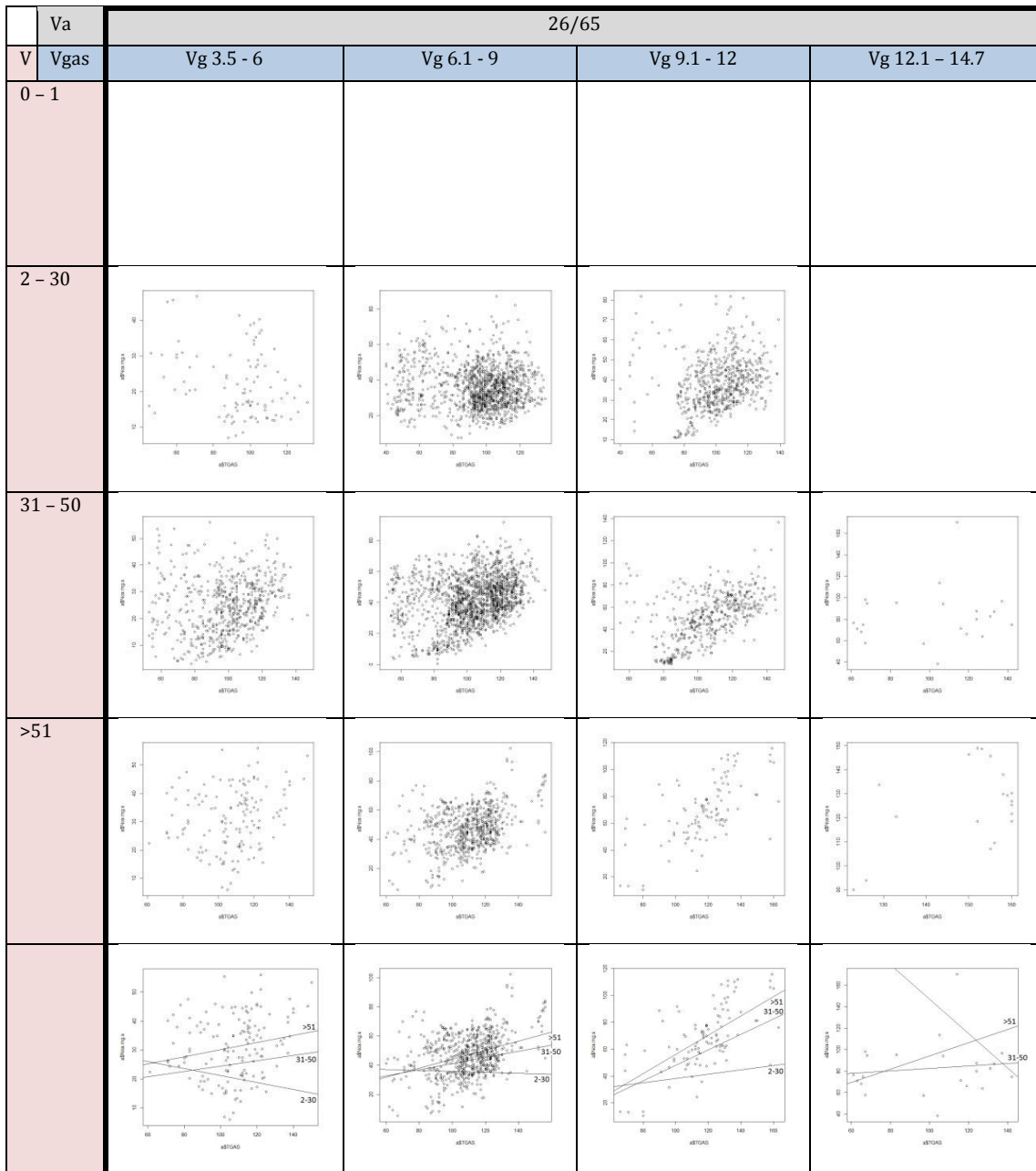


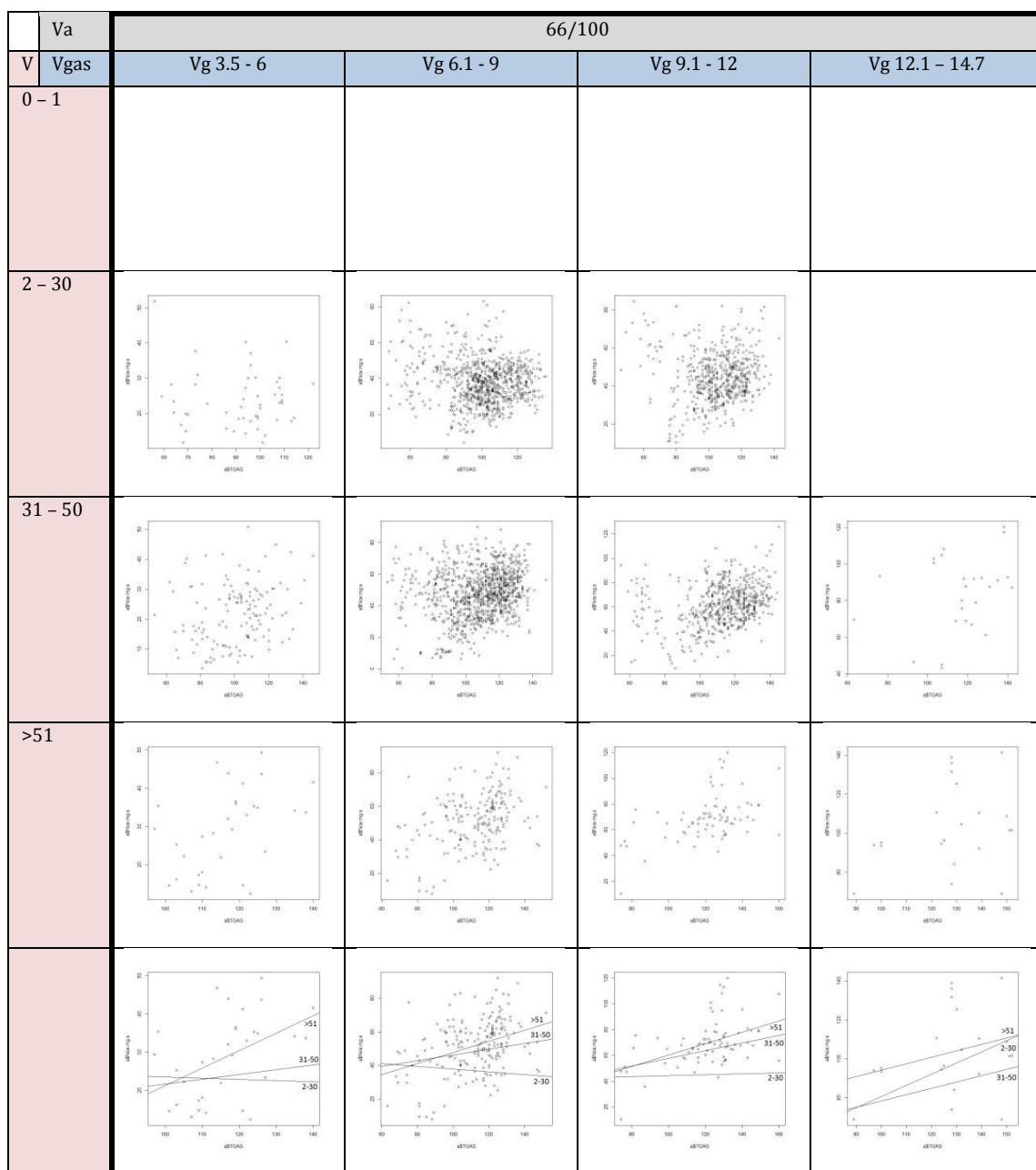


**Prilog 16. Zavisnost emisije NO<sub>x</sub> od temperature gasa po klasama brzina, potrebne snage i brzine izduvnog gasa u uslovima ubrzanja**

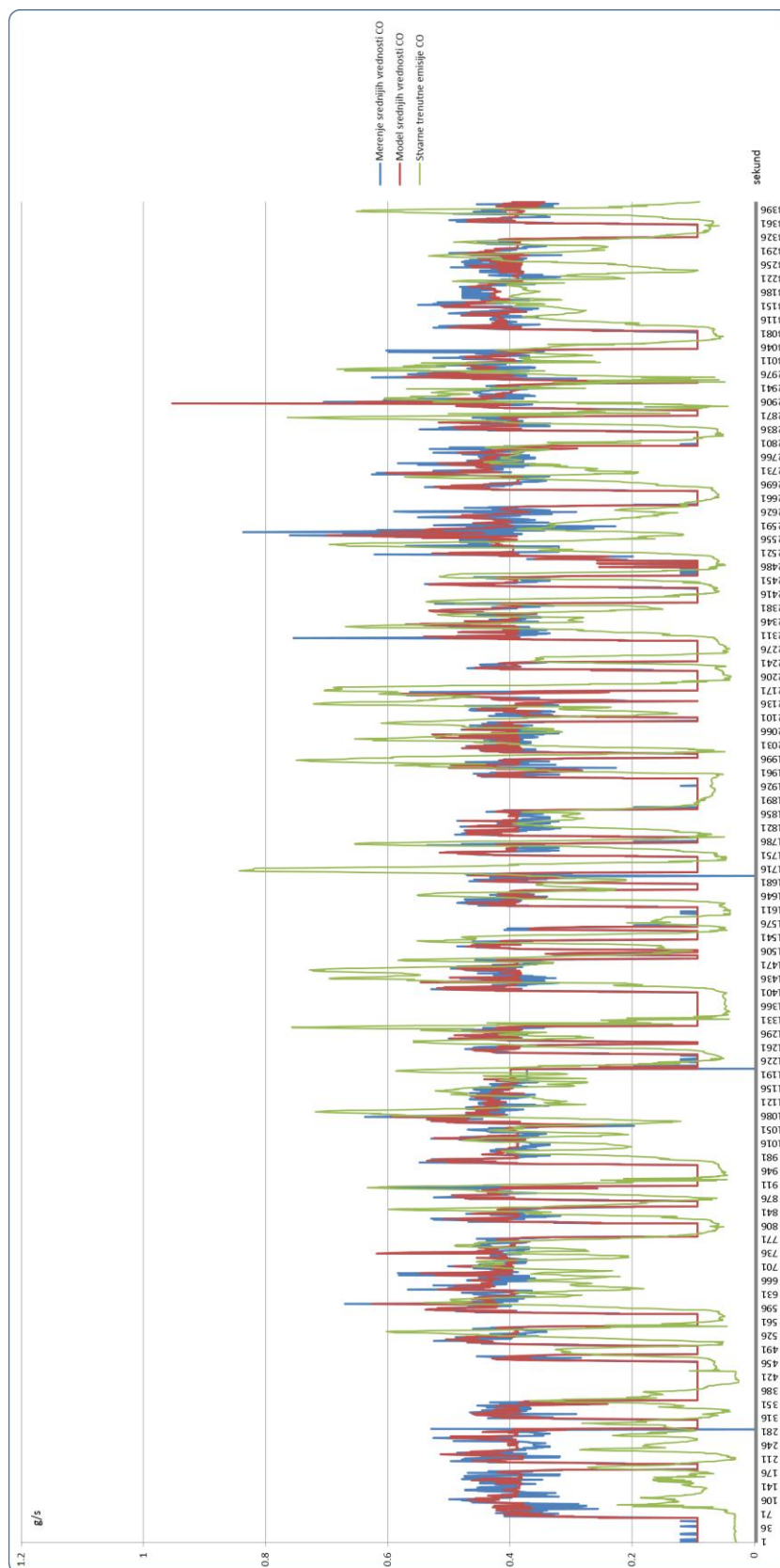




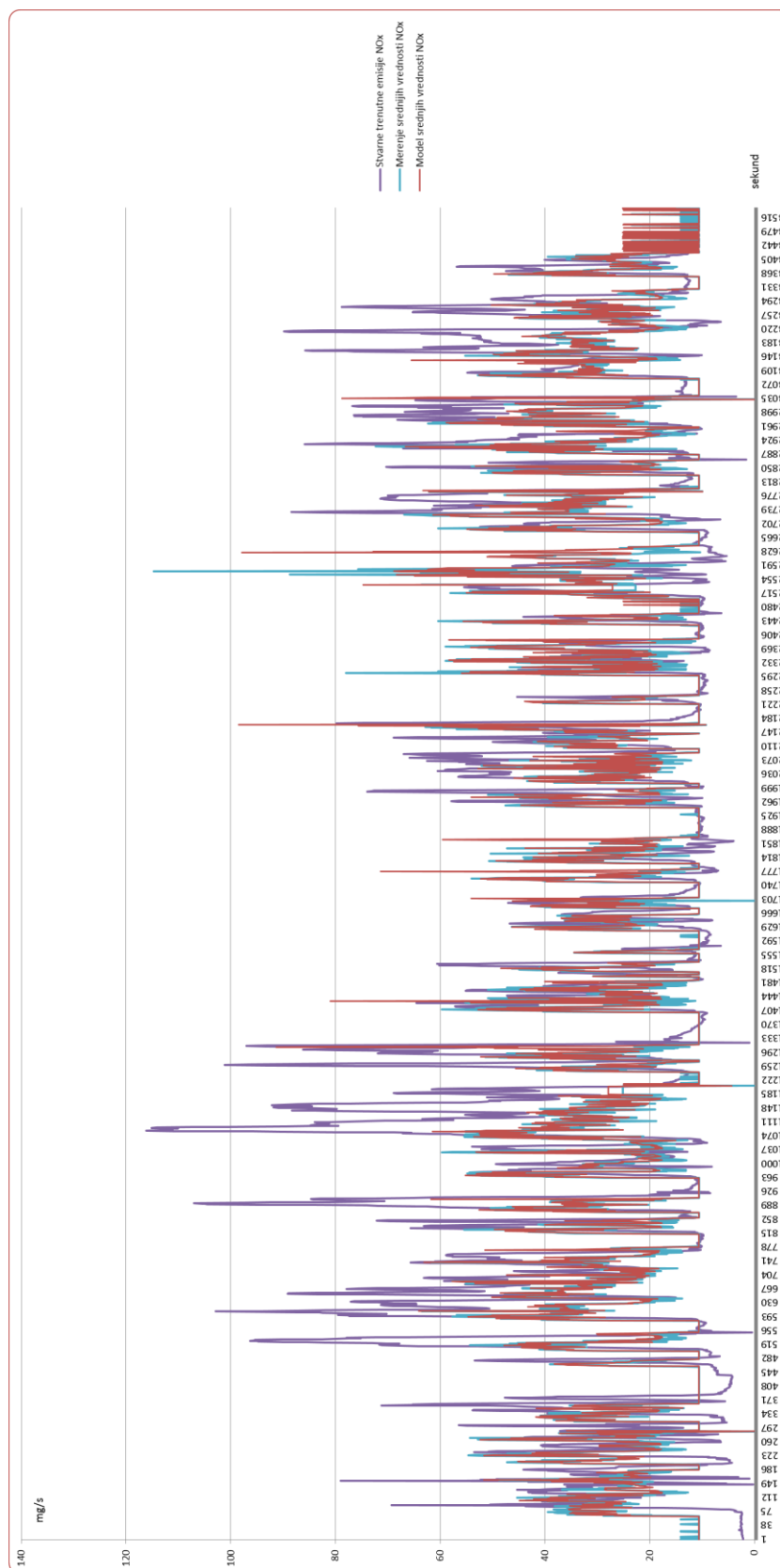




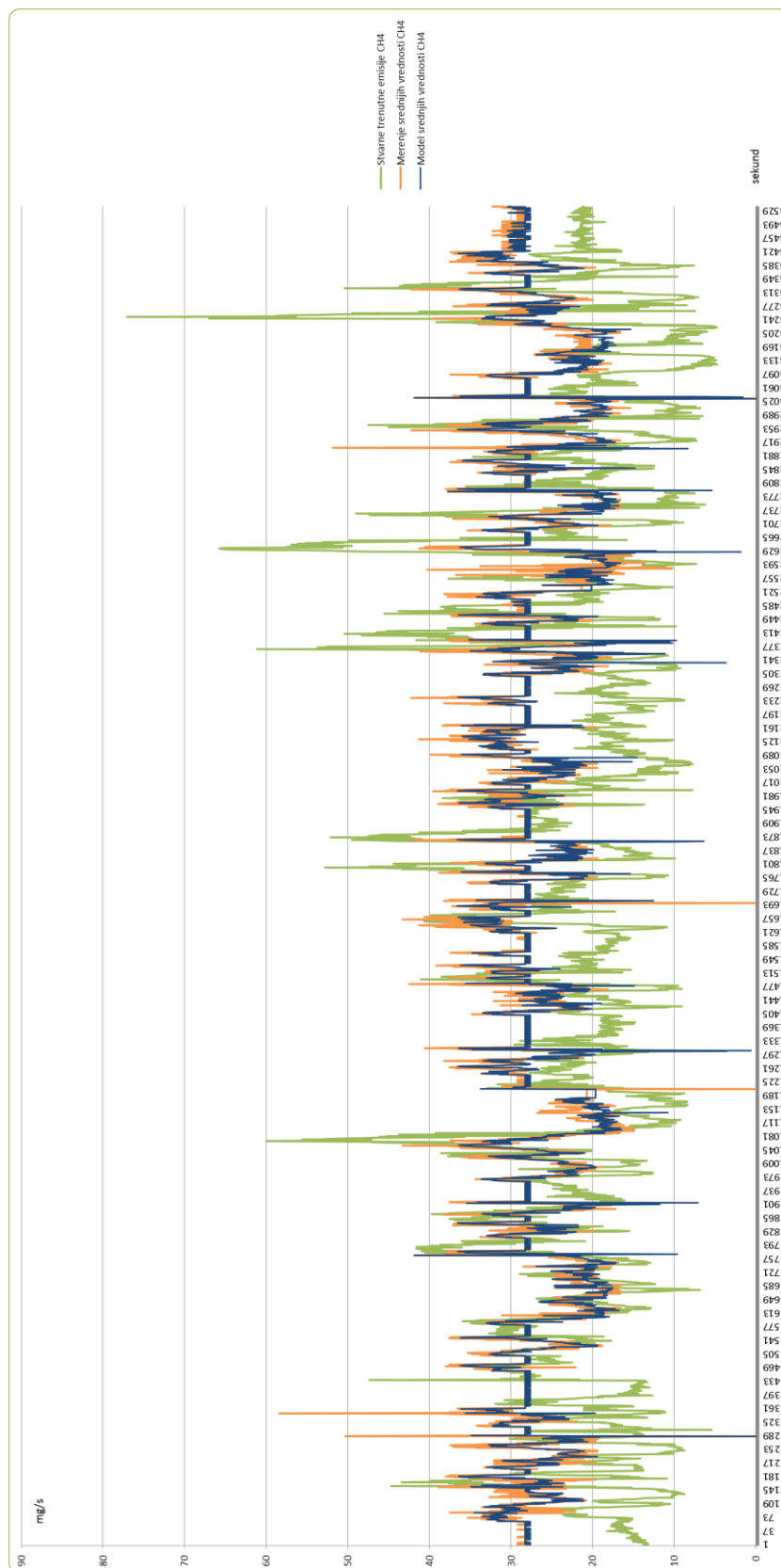
## Prilog 17. Poređenje vrednosti dobijenih modelom i na osnovu istraživanja za CO



## Prilog 18. Poređenje vrednosti dobijenih modelom i na osnovu istraživanja za NOx



## Prilog 19. Poređenje vrednosti dobijenih modelom i na osnovu istraživanja za CH<sub>4</sub>



## Biografija autora

Vladimir D. Đorić rođen je 1978. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Diplomirao je 2005. godine na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu na Odseku za drumski i gradski saobraćaj i transport, na temu „Upotreba planerskog paketa VISUM u modeliranju ekoloških parametara“ sa ocenom 10 i prosečnom ocenom tokom studiranja 8.13 (13/100). Poslediplomske studije na Univerzitetu u Beogradu - Saobraćajnom fakultetu, smer Planiranje i regulisanje drumskog i gradskog saobraćaja upisao je školske 2005/06. godine. Radio je mestu asistenta pripravnika na Katedri za saobraćajno inženjerstvo na predmetima Planiranje saobraćaja i Osnove planiranja saobraćaja.

Magistrirao je 2010. godine na Univerzitetu u Beogradu - Saobraćajnom fakultetu sa temom „Modeliranje raspodele saobraćaja na mreži – primer Beograda“ ocenom 10 i prosečnom ocenom tokom studiranja 9.83 (83/100). Od 2010. kao asistent za užu naučnu oblast „Planiranja saobraćaja i saobraćajne infrastrukture“ angažovan je na osnovnim akademskim studijama na izvođenju vežbi iz predmeta Planiranje saobraćaja – Analiza transportnih zahteva, Planiranje saobraćaja – Modeliranje i prognoze, Strategije i taktike u planiranju saobraćaja i Uticaj saobraćaja na životnu sredinu. Na master akademskim studijama radi na predmetima Planiranje saobraćaja – saobraćajna infrastruktura i Prognoze u saobraćaju.

Autor je i koautor 13 radova objavljenih u: časopisima međunarodnog značaja (3 rada na SCI listi); nacionalnog značaja (3 rada); na naučim i stručnim skupovima od međunarodnog značaja (4 rada) i nacionalnog značaja (3 rada). Kao član je autorskog tima učestvovao je u izradi 15 studija i 2 naučna projekta.

Odlično govori engleski jezik i služi se ruskim jezikom. Oženjen je, otac jednog deteta.

## Izjava o autorstvu

Potpisani-a Vladimir D. Đorić

Broj indeksa \_\_\_\_\_

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

#### **ISTRAŽIVANJE I MODELIRANJE EMISIJA VOZILA U FUNKCIJI MODELIRANJA SAOBRAĆAJNIH TOKOVA NA ULIČNOJ MREŽI**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, 26.6.2013.

\_\_\_\_\_

## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Vladimir D. Đorić

Broj indeksa \_\_\_\_\_

Studijski program \_\_\_\_\_

Naslov rada **ISTRAŽIVANJE I MODELIRANJE EMISIJA VOZILA U  
FUNKCIJI MODELIRANJA SAOBRAĆAJNIH TOKOVA  
NA ULIČNOJ MREŽI**

Mentor Prof. Dr Jadranka Jović

Potpisani Vladimir D Đorić

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu.**

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, 26.6.2013.

\_\_\_\_\_



## **Izjava o korišćenju**

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

### **ISTRAŽIVANJE I MODELIRANJE EMISIJA VOZILA U FUNKCIJI MODELIRANJA SAOBRAĆAJNIH TOKOVA NA ULIČNOJ MREŽI**

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, 26.6.2013.

---

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.