



UNIVERZITET U NOVOM SADU

Fakultet tehničkih nauka

Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštitu na radu

**Model detekcije benzena, toluena, etilbenzena i ksilena
u izduvnim gasovima motornih vozila primenom gasne
hromatografije u funkciji procene zagađenja
ambijentalnog vazduha**

Doktorska disertacija

Mentor: Prof. emeritus Mirjana Vojinović Miloradov

Kandidat: mr Dragan Adamović

Novi Sad, 2014 godine



UNIVERZITET U NOVOM SADU • FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KLJUČNA DOKUMENTCIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, RBR:			
Identifikacioni broj, IBR:			
Tip dokumentacije, TD:	Monografska dokumentacija		
Tip zapisa, TZ:	Tekstualni štampani materijal		
Vrsta rada, VR:	Doktorska disertacija		
Autor, AU:	mr Dragan Adamović		
Mentor, MN:	dr Mirjana Vojinović, profesor emeritus		
Naslov rada, NR:	Model detekcije benzena, toluena, etilbenzena i ksilena u izduvnim gasovima motornih vozila primenom gasne hromatografije u funkciji procene zagađenja ambijentalnog vazduha		
Jezik publikacije, JP:	Srpski		
Jezik izvoda, Jl:	Srpski/Engleski		
Zemlja publikovanja, ZP:	Republika Srbija		
Uže geografsko područje, UGP:	Autonomna Pokrajina Vojvodina		
Godina, GO:	2014		
Izdavač, IZ:	Autorski reprint		
Mesto i adresa, MA:	Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad		
Fizički opis rada, FO: (poglavlja/strana/	9 poglavlja/ 160 strana/ 99 literaturnih navoda/ 20 tabela/ 63 slike/ 4 priloga		
Naučna oblast, NO:	Tehničke nauke		
Naučna disciplina, ND:	Inženjerstvo zaštite životne sredine		
Predmetna odrednica/Ključne reči, PO:	Zagađenje vazduha, BTEX jedinjenja, motori SUS, model emisije BTEX jedinjenja		
UDK			
Čuva se, ČU:	Biblioteka Fakulteta tehničkih nauka		
Važna napomena, VN:			
Izvod, IZ:	U okviru doktorske disertacije opisane su jedinstvene fizičko-hemijske karakteristike grupe supstanci benzena, toluena, etilbenzena i ksilena koje pripadaju istraživanjima najnovijeg trenda naučne javnosti. Posebno su opisane perzistencija i pseudoperzistencija, transport, distribucija i negativan i toksičan uticaj na zdravlje čoveka i životnu sredinu. Sprovedena su eksperimentalna istraživanja zavisnosti koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja u izduvnim gasovima i operativnih parametara eksperimentalnog motora SUS. Na osnovu dobijenih rezultata eksperimentalnih istraživanja definisan je emisijski model BTEX jedinjenja simulacijom kretanja putničkog automobila Fiat Punto Classic u skladu sa NEDC ciklusom koji na odgovarajući način reprezentuje standarde uslove vožnje u evropskim gradovima.		
Datum prihvatanja teme, DP:	12.07.2012., rešenje broj 04-29/10		
Datum odbrane, DO:			
Članovi komisije, KO:	Predsednik:	dr, Ilija Ćosić, redovni profesor	Potpis mentora
	Član:	dr, Anja Jokić, redovni profesor	
	Član:	dr, Jovan Dorić, docent	
	Član:	dr, Mira Popovć, redovni profesor	
	Član, mentor:	dr, Mirjana Vojinović- Miloradov profesor emeritus	



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monograph documentation
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	Ph.D. Thesis
Author, AU :	Dragan Adamović, M.Sci.
Mentor, MN :	Dr. Mirjana Vojinović- Miloradov, professor emeritus
Title, TI :	Detection model of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene in exhaust gases of motor vehicles by using gas chromatography in evaluating of ambient air pollution
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2013
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9 Chapters/ 160 Pages/ 99 References/ 20 Tables/ 63 Figures/ 4 Appendixes
Scientific field, SF :	Technical science
Scientific discipline, SD :	Environmental Engineering
Subject/Key words, S/KW :	Air pollution, BTEX compounds, IC engine, emission model of BTEX compounds
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	In this thesis, the unique physicochemical characteristics of a group of substances consisting of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene have been described. Special emphasis has been placed on their characteristics of persistence and pseudo-persistence, transport, distribution and the negative and toxic influence on human health and the environment. The experimental research of the interdependence of the concentration levels of BTEX compounds in the exhaust gases and the operational parameters of the experimental IC engine has been conducted. Based on the experimental research results, the emission model of the BTEX compounds has been defined by a simulation of movement of a Fiat Punto Classic passenger car in accordance with the NEDC cycle, which appropriately represents the standard driving conditions in European cities. Research conducted within the thesis represents the newest trend of investigation in the scientific world.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	12.07.2012.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Ph.D. Ilija Ćosić, Full Professor
Member:	Ph.D. Anja Jokić, Full Professor
Member:	Ph. D. Jovan Dorić, Assistant Professor
Member:	Ph. D. Mira Popović, Full Professor
Member, Mentor:	Ph. D. Mirjana Vojinović- Miloradov, Professor Emeritus
	Menthor's sign

SADRŽAJ

1.	UVOD	4
2.	BTEX jedinjenja.....	6
2.1.	Koncentracioni nivoi BTEX jedinjenja u ambijentalnom vazduhu	8
2.2.	Fizičko-hemijske karakteristike BTEX jedinjenja.....	9
2.3.	Uticaj BTEX jedinjenja na zdravlje	11
2.4.	Sudbina BTEX jedinjenja u životnoj sredini	12
2.4.1.	Transport i raspodela.....	12
2.4.2.	Transformacija i degradacija BTEX jedinjenja u atmosferi	13
2.5.	Izvori BTEX jedinjenja u životnoj sredini.....	18
3.	MOTORI SUS	21
3.1.	Stvaranje smeše kod Oto motora	21
3.2.	Sagorevanje.....	27
3.2.1.	Pogonska goriva.....	27
3.2.2.	Fizički aspekt procesa sagorevanja.....	29
3.2.3.	Hemijski aspekt procesa sagorevanja ugljovodonika	30
3.3.	Izvori emisije BTEX jedinjenja u procesu sagorevanja u motoru	34
3.4.	Koeficijent viška vazduha- λ	36
3.5.	Značaj odnosa vazduha i goriva.....	39
3.6.	Uređaji za smanjenje emisije toksičnih gasova	40
3.7.	Katalizator.....	43

3.8.	Lambda sonda	46
4.	EKSPERIMENTALNI DEO	48
4.1.	Oto motor EFI 1.1	49
4.2.	Dinamometar SCHENCK W 230 sa propratnom opremom.....	49
4.3.	Piezoelektrični senzor pritiska u cilindru.....	50
4.4.	AVL pojačivač	51
4.5.	Senzor položaja kolenastog vratila	51
4.6.	Elektronska upravljačka jedinica- ECU.....	52
4.7.	Merenje koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja	53
4.7.1.	Mobilni gasni hromatograf Voyager–Photovac.....	54
4.7.2.	Uzorkovanje	56
4.7.3.	Kolone Voyagera	56
4.7.4.	Fotojonizacioni detektor- PID.....	57
4.8.	Merenja koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja	58
5.	REZULTATI I DISKUSIJA	60
5.1.	Statistička obrada podataka i interpretacija eksperimentalnih rezultata	61
5.2.	EUROPREMIUM benzin	63
5.2.1.	Post-hoc analize	64
5.2.2.	Efekti interakcije drugog i trećeg reda.....	71
5.3.	NIS- benzin	78
5.3.1.	Post hoc analize.....	79
5.3.2.	Efekti interakcije drugog i trećeg reda.....	85
5.4.	Korelacija koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja	92
6.	MODEL EMISIJE BTEX JEDINJENJA.....	94

6.1. Ciklusi vožnje	94
6.1.1. Novi Evropski Ciklus Vožnje- NEDC	96
6.1.2. Važnost ciklusa vožnje u modelovanju emisije	99
6.2. Modalna emisija.....	100
6.3. Razvoj modela emisije BTEX jedinjenja.....	100
6.3.1. Potrošnja goriva	101
6.3.2. Energija potrebna za kretanje vozila.....	102
6.3.3. Specifična efektivna potrošnja goriva.....	106
6.4. Model emisije BTEX jedinjenja za Fiat Punto Classic.....	109
6.5. EUROPREMIUM	111
6.6. NIS gorivo.....	114
6.7. Komparacija rezultata modela za Europremium i NIS gorivo.....	116
7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA	119
8. LITERATURA	123
PRILOG I.....	130
PRILOG II.....	138
PRILOG III	146
PRILOG IV	150
Lista Slika.....	154
Lista Tabela.....	157
Lista skraćenica.....	158
Lista oznaka	159

1. UVOD

Zagađenje vazduha uzrokovano izduvnim gasovima motornih vozila predstavlja veliki problem kako zbog konstantnog povećanja broja motornih vozila tako i sve većih pređenih rastojanja svakog vozila tokom godine. Od 60-ih godina prošloga veka broj motornih vozila u svetu, kao i broj korisnika, uvećava se znatno brže u odnosu na svetsku populaciju. Polovinom prošloga veka bilo je oko 50 miliona automobila u odnosu na svetsku populaciju od 3,5 milijarde ljudi. Svetska populacija danas broji oko 6 milijardi ljudi, dok se broj automobila procenjuje na oko 700 miliona. Procenjuje se da će uz sadašnji nivo proizvodnje od oko 45 miliona automobila godišnje, ukupan broj preći milijardu vozila do 2020. godine. Stopa rasta svih motornih vozila je danas oko 5%, dok je godišnja stopa rasta svetske populacije između 1 i 2% (Colls, 2002). Kao primaran izvor energije motorna vozila koriste fosilna goriva čijim sagorevanjem nastaju gasovite, tečne i čvrste zagađujuće materije.

Konstantna emisija polutanata u ambijentalni vazduh utiče na globalne procese porasta koncentracionih nivoa zagađujućih supstanci, distribucije i raspodele između osnovnih kompartimenata životne sredine, biotskog i abiotskog matriksa. Posledice nekontrolisane emisije polutanata vezane su za prisustvo velikih količina različitih gasova, pre svih ugljen-dioksida (CO_2), sumpor-dioksida (SO_2), metana (CH_4), oksida azota (N_xO_y), lako isparljivih organskih komponenti (VOC) kao i velikog broja specifičnih hazardnih i kancerogenih supstanci u atmosferi. Usled toga, kao i uz prisustvo suspendovanih čestica u atmosferi, narušen je intenzitet razmene energije sa okolinom efektom termalne kontaminacije i pospešeno je zagađivanje atmosferskim padavinama hemijski agresivno-kiselog karaktera. Povećanje ljudske populacije, naročito na geografskim prostorima sa brojnom siromašnom populacijom i nerazvijenom politikom zaštite životne sredine i očuvanja prirodnih resursa, sa odlukama o ubrzanom privrednom, pre svega industrijskom razvoju, uzrokuje stalno povećanje potreba za različitim vidovima energije i vodi ka stalnoj degradaciji životne sredine.

Sagorevanje je osnovni proces tokom kojeg se hemijska energija iz goriva pretvara u toplotnu i dalje u mehanički rad u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS). Od ukupne energije koja se oslobađa procesom sagorevanja, oko 42% se koristi za pokretanje vozila, dok preostalih 58%

predstavlja gubitke. Razvoj i upotreba novih tehnologija, u cilju smanjenja emisije štetnih gasova, dovela je do naprednih rešenja koja su smanjila emisiju za više od 95%. Sagorevanje u motorima SUS predstavlja veoma kompleksan fizičko-hemijski proces sa naglim promenama temperature, pritiska i koncentracija reaktivnih supstanci. Usled složenosti procesa hemijske konverzije u komori za sagorevanje, još uvek nije definisana zadovoljavajuća teorija koja bi opisala navedeni proces u svakom detalju.

Najnoviji ekološki standardi Evropske Unije koji se odnose na izduvne gasove motornih vozila, počev od Euro 1, pa sve do najnovijeg Euro 6 standarda koji se primenjuju u zemljama EU od septembra 2014. godine, fokusirani su, pre svega, na smanjenje emisije gasova staklene bašte: CO₂, CO, N_xO_y, suspendovanih čestica i drugih supstanci. Eksperimentalni rezultati istraživanja ukazuju i na visoke koncentracione nivoe aromatičnih jedinjenja u izduvnim gasovima motornih vozila. Prisustvo hazardnih polutanata iz grupe BTEX javlja se pre svega kao rezultat supstitucije olova kao antidetonatora sa aromatičnim jedinjenjima u bezolovnim benzinima, čime je praktično izvršena zamena jednog problema drugim. Globalni procesi raspodele, distribucije i transporta na velike udaljenosti (LRT- Long Range Transport) čine problem emisije BTEX jedinjenja iz mobilnih izvora još većim.

Trenutno stanje u Republici Srbiji karakteriše visoka prosečna starost putničkih automobila, od oko 16 godina, nepostojanje planova za uvođenje stroge tehničke kontrole vozila u saobraćaju, neusklađenost regulative u oblasti emisije sa Direktivama EU, loš kvalitet motornog benzina, nepotpuna mreža monitoringa kvaliteta ambijentalnog vazduha, kao i nedostatak podsticajnih ekonomskih mera za smanjenje emisija u vazduhu.

U okviru doktorske teze se po prvi put na teritoriji Republike Srbije radi istraživanje o količinama lako isparljivih organskih komponenti emitovanih iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem u cilju razvijanja i definisanja odgovarajućeg emisionog modela BTEX jedinjenja, kao dominantnih mobilnih izvora, koncentrisanih u gradskim sredinama.

2. BTEX JEDINJENJA

Skraćenica BTEX se odnosi na grupu jedinjenja: benzena, toluena, etilbenzena i izomera ksilena, koji se u prirodi javljaju kao komponente sirove nafte. Po fizičko-hemijskim karakteristikama BTEX jedinjenja pripadaju grupi aromatičnih ugljovodonika i koriste se kao polazna materija u baznoj hemiji za proizvodnju drugih organskih jedinjenja kao što su: organski rastvarači, razređivači, odmašćivači, lepkovi, lakovi, boje i plastične mase. Pored toga, aromatični ugljovodonici se koriste i kao aditivi u motornim benzinima, stabilizatori i konzervansi u prehrambenoj industriji. Zbog niske vrednosti Henrijeve konstante, fugasnosti i težnje ka prelasku u gasnu fazu, BTEX jedinjenja se svrstavaju u grupu lako isparljivih organskih komponenti VOC (Volatile Organic Compounds).

Prisustvo VOC jedinjenja u ambijentalnom vazduhu utiče na generisanje fotohemijskih oksidanata, u prvom redu ozona i peroksiacetilnitrata (PAN), štetnih po zdravlje ljudi i životnu sredinu. Sinergija štetnog efekta BTEX jedinjenja je očekivana s obzirom na to da se u izveštajima koji se odnose na monitoring ambijentalnog vazduha detektuju najčešće kao grupa (Buczynskaa i dr., 2009; Bolton 2000).

Pored narušavanja globalnog prirodnog scenarija životne sredine BTEX jedinjenja negativno utiču na zdravlje čoveka kao izazivači malignih oboljenja, pre svega kao posledica hronične ekspozicije, zbog čega su propisane veoma niske dozvoljene koncentracije u životnoj sredini. Primarne posledice uticaja na ljudsko zdravlje predstavljaju: iritacija očiju i disajnih puteva, dok se glavobolje, oftalmološki i problemi sa pamćenjem smatraju direktnim simptomima. Više međunarodnih zdravstvenih organizacija među kojima, u prvom redu, IARC (International Agency for Research on Cancer), WHO (World Health Organization) i EPA (Environmental Protection Agency) su na osnovu epidemioloških podataka dobijenih ispitivanjem humanog materijala i eksperimentalnih rezultata na životinjama (*in-vitro*) definisale liste kancerogenih hemijskih jedinjenja. Među brojnim hemijskih kancerogenima ističu se aromatični ugljovodonici, u prvom redu benzen, kao najtoksičniji predstavnik grupe BTEX (Bolton, 2000).

BTEX jedinjenja su sveprisutna u atmosferi, emituju se u životnu sredinu iz industrijskih i prirodnih izvora, mada je antropogena emisija nesumnjivo najvažnija. Identifikovana su u

uzorcima vazduha u ruralnom i urbanom okruženju, kao i u uzorcima vazduha u zatvorenim prostorijama. Najveće industrijske izvore BTEX jedinjenja predstavljaju rafinerije nafte i petrohemijski kompleksi (Barregard i dr., 2009), dok je saobraćaj najrasprostranjeniji emiter BTEX jedinjenja, posebno kod vozila koja koriste bezolovni benzin. Iz tog razloga količina benzena, kao dokazanog kancerogena, u gorivu se prema evropskim standardima ograničava na 1% (vol.) (Vukmirović, 2007).

Iako se velike količine BTEX-a ispuštaju u okruženje, koncentracioni nivoi su relativno niski zbog efikasne depozicije, transporta i fenomena distribucije i raspodele. U poređenju sa drugim volatilnim organskim jedinjenjima benzen ima relativno nisku reaktivnost, tako da je njegovo vreme poluživota ($t_{1/2}$) u atmosferi duže i može se prenositi na velike udaljenosti (LRT) (Khillare i dr., 2008).

Reakcije hemijske degradacije, u prvom redu reakcije sa hidroksilnim radikalima, ograničavaju vreme boravka benzena u atmosferi na svega nekoliko dana, u nekim slučajevima i na nekoliko sati. U zemljištu ili u vodotokovima BTEX jedinjenja su podložna isparavanju, fotooksidaciji i biodegradaciji. Transformacija, posebno biodegradacija koja se odvija pod aerobnim uslovima je važan proces za degradaciju BTEX jedinjenja koja se nalaze u zemljištu i vodi.

Najvećim delom BTEX jedinjenja se raspodeljuju u vazduh (99,9%) pri čemu inhalacija predstavlja dominantan put ekspozicije čoveka i čini 99% dnevnog unosa (Hattemer-Frey i dr, 1990; MacLeod i Mackay, 1999). Ljudska populacija je izložena BTEX-ima putem duvanskog dima, kako putem aktivnog, tako i pasivnog pušenja i udisanjem kontaminiranog vazduha, posebno u zonama opterećenim gustim saobraćajem i u blizini benzinskih stanica. Vazduh u blizini postrojenja koja proizvode ili koriste BTEX-e, kao i vazduh u blizini deponija i odlagališta opasnog otpada, predstavljaju dodatne izvore ekspozicije BTEX-ima. Najviše su svakako izloženi pojedinci koji su na svojim radnim mestima u direktnom kontaktu sa jedinjenjima iz grupe BTEX.

2.1. Koncentracioni nivoi BTEX jedinjenja u ambijentalnom vazduhu

Ambijentalne koncentracije benzena u Evropi su regulisane direktivama (EU directive 2000/69/EC, 2010) i ograničene na $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kao prosečna vrednost na godišnjem nivou. Koncentracioni nivoi toluena etilbenzena i ksilena su još uvek neregulisani.

U ruralnim i oblastima udaljenim od primarnih izvora emisije u Evropi, koncentracija *benzena* kreće se od 0,03-0,3 ppb ($0,1\text{-}1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). U Severnoj Americi uključujući globalne stanice na Arktiku, Havajima i kod Haitija, iznosi 0,04 ppb ($0,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Na Arktiku koncentracija benzena je tri puta viša nego na Havajima, kao rezultat globalnih procesa kondenzacije i depozicije. U 1990. godini u skandinavskim gradovima su izmerene srednje godišnje koncentracije ispod 0,77 ppb ($2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Direktorat evropske komisije za zaštitu životne sredine (European Commission Directorate-General for the Environment) je 1992. godine pokrenuo kampanju monitoringa kvaliteta ambijentalnog vazduha u 10 evropskih gradova u sklopu odgovarajućih programa (Auto-Oil Programme I i Auto-Oil Programme II). Tokom kampanje, koja je završena 2010 godine, mereni su koncentracioni nivoa benzena. Srednja godišnja koncentracija benzena, izuzev u uskim prometnim ulicama, tunelima i industrijskim zonama, bila je ispod ili blizu 3,2 ppb ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Najviša srednja godišnja koncentracija benzena je izmerena u Atini i iznosila je 6,13 ppb ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Maksimalne koncentracije benzena na nivou od 123 ppb ($400 \mu\text{g}/\text{m}^3$) izmerene su kod tunela u Parizu i u neposrednoj blizini benzinskih stanica (Vukmirović, 2007)

Koncentracije *toluena* u opsegu od 0,9-70,1 ppb detektovane su u ambijentalnom vazduhu ruralnih sredina (Khalil i Rasmussen, 1992). U urbanim sredinama detektovane su koncentracije toluena u opsegu od 0,06-195 ppb (EPA, 1991c; Kelly i dr. 1993), dok su u sredinama u blizini izvora emisije toluena detektovane koncentracije u opsegu 2,2-751,5 ppb (Kelly i dr. 1993). Postoji veliki broj različitih izvora emisije, pri čemu emisija iz automobila daje najveći doprinos ukupnoj količini toluena u atmosferi. Ekstremna vrednost izmerene trenutne koncentracije toluena u tunelu u Los Anđelesu iznosila je 748 ppm (Garcia i dr., 1992). Koncentracije toluena u kabinama vozila se kreću u opsegu 0,56 do 42,0 ppb (Fan i Alexeeff, 1999). U nekoliko studija u kojima je praćen nivo toluena u zatvorenim prostorijama (kancelarijama i stanovima) koncentracije toluena su se kretale u opsegu od 0,7 do 24,2 ppb ($2,63\text{-}90,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) uglavnom

kao rezultat prodiranja kontaminiranog vazduha koji potiče od emisije iz saobraćaja (Wallace i dr., 1986; Kelly i dr., 1993).

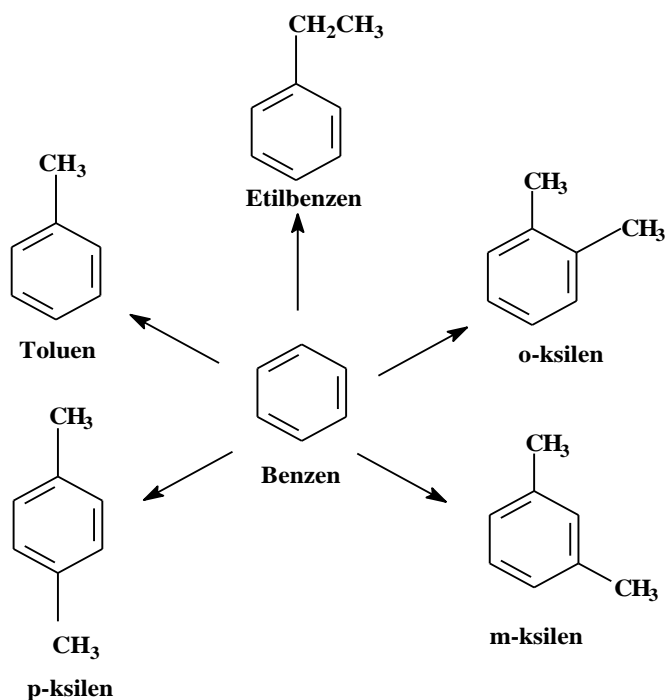
Etilbenzen je uobičajen kontaminant ambijentalnog vazduha. Srednji nivo etilbenzena u američkim gradovima iznosi 0,62 ppb ($2,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Nasuprot ovim koncentracijama, prosečna koncentracija izmerena u ruralnim lokacijama je 0,013 ppb ($0,056 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Koncentracije *ksilena* detektovane u ambijentalnom vazduhu u SAD kreću se od 1 do 30 ppb ($4,34\text{-}13,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Izmerene vrednosti koncentracija ksilena u prostorijama u blizini prometnih saobraćajnica kreću se u opsegu od 1 do 10 ppb ($4,34\text{-}43,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ponovo kao rezultat infiltracije emisija iz saobraćaja.

2.2. Fizičko-hemijske karakteristike BTEX jedinjenja

BTEX jedinjenja spadaju u grupu monoaromatičnih ugljovodonika. U osnovi svakog jedinjenja iz grupe BTEX nalazi se planarni molekul benzena koji sadrži 6 atoma ugljenika povezanih *aromatičnom vezom*. Po dužini, aromatična veza fluktuirá između jednostruke ($0,154 \text{ nm}$) i dvostruke veze ($0,133 \text{ nm}$) i iznosi $0,139 \text{ nm}$. Svaki ugljenikov u benzenovom prstenu gradi hemijske veze pomoću 3 sp^2 hibridne atomske orbitale i 1 p atomske orbitale. Dve sp^2 hibridne orbitale svaki C atom koristi za građenje 2 σ veze sa 2 susedna C atoma u prstenu, a treću sp^2 hibridnu orbitalu za građenje 1 σ veze sa atomom H ili nekom atomskom grupom. Svaki C atom u prstenu koristi po 1 p atomsku orbitalu za građenje delokalizovane π veze, koja jednako pripada svakom od 6 C atoma u prstenu. Svih 6 C-atoma leže u istoj ravni, u uglovima pravilnog šestougona. Ovakvu geometriju benzenovog molekuskog sistema uslovljava sp^2 -hibridizacija.

Benzenovi homolozi se dobijaju tako što se jedan ili više atoma vodonika, molekula benzena, zamene alkil grupom. Prvi homolog benzena je toluen ili toulol (po staroj nomenklaturi) ili metilbenzen po IUPAC nomenklaturi. Toluén nastaje zamenom jednog atoma vodonika metil grupom ($-\text{CH}_3$). Kod etilbenzena atom vodonika zamenjen je etil grupom ($-\text{CH}_2\text{CH}_3$), dok izomeri ksilena pripadaju gupi dimetil benzena kod kojih su dva atoma vodonika u benzenovom molekulu zamenjena metil grupama u različitim pozicijama (orto, meta i para). Strukturne formule BTEX jedinjenja prikazane su na slici 2.1.



Slika 2.1. Strukturne formule BTEX jedinjenja.

Benzen i njegovi homolozi su slabo polarni, nerastvorni u vodi, rastvorljivi u nepolarnim rastvaračima kao što su alkoholi, etri, ugljentetrahlorid i drugi. Benzen je dobar rastvarač nepolarnih jedinjenja, te se u najvećoj meri upotrebljava u hemijskoj i farmaceutskoj industriji, kao početno jedinjenje ili intermedijer u sintezi brojnih hemikalija, u proizvodnji guma, lubrikanata, boja, deterdženata, narkotika, pesticida i kao aditiv u benzinu, zbog svojih antidetonatorskih karakteristika.

EPA je okarakterisala BTEX jedinjenja kao hazardne polutante vazduha i kao opasan otpad (EPA, 1977a). Prema klasifikaciji međunarodne organizacije za istraživanje raka IARC benzen spada u prvu grupu humanih kancerogena. Usled dokazanih kancerogenih svojstava američka agencija za zaštitu životne sredine US EPA (US Environmental protection agency) ograničava upotrebu benzena. Mnogi proizvodi koji su u prošlosti koristili benzen tokom sinteze, danas koriste druge organske rastvarače. Benzen se u takvim proizvodima može naći samo u tragovima. Američka komisija za bezbednost proizvoda široke upotrebe CPSC (The Consumer Products Safety Commission) zabranjuje proizvode sa sadržajem benzena većim od 0,1 vol%,

bilo kao osnovnog sastojka ili kao kontaminanta, izuzev benzina i laboratorijskih reagenasa (HSDB, 2005 ; Duarte-Davidson i dr. 2001).

2.3. Uticaj BTEX jedinjenja na zdravlje

BTEX jedinjenja dospevaju u organizam preko pluća, gastrointestinalnog trakta kao i putem kože. Nakon inhalacije ili ingestije BTEX jedinjenja dospevaju u krvotok, pri čemu postoji mogućnost privremenog skladištenja u masnom tkivu. Benzen i njegovi homolozi se transformišu u metabolite u jetri i izlučuju se iz organizma putem urina nakon 48 sati od ekspozicije.

Brojni faktori određuju da li će doći do uticaja na zdravlje nakon ekspozicije BTEX-ima i ukazuju na ozbiljnost izazvanih efekata. Pomenuti faktori uključuju koncentracione nivoe, kao i dužinu ekspozicije. Kratkotrajna ekspozicija (5-10 min) veoma visokim koncentracionim nivoima benzena (1000–2000 ppm) može rezultirati letalnim ishodom. Niži koncentracioni nivoi benzena (70-300 ppm) u kratkom vremenskom intervalu mogu uzrokovati pospanost, vrtoglavicu, ubrzan rad srca, glavobolje, drhtavicu, zbunjenost i nesvesticu. U većini slučajeva navedeni simptomi nestaju kada ekspozicija prestane. Kancerogenost benzena je dokumentovana u velikom broju slučajeva kod radnika izloženih uticaju benzena (Zhang i dr., 2014; Ciarrocca i dr., 2012). Epidemiološke studije i izveštaji u pojedinim slučajevima obezbeđuju dokaze o uzročno posledičnim vezama hronične izloženosti benzenu i produktima koji sadrže benzen sa akutnom mijelogenoznom leukemijom (AML) (Pejin, 2007; Ciarrocca i dr., 2012). Neurološki efekti obično nastaju kao rezultat ekspozicije visokim koncentracijama benzena. Fatalna inhalaciona ekspozicija povezana je sa vaskularnom kongestijom u mozgu, dok je hronična inhalacija povezana je sa neuropatijom, nesanicom i gubitkom memorije. Izloženost uticaju benzena može biti štetna i po reproduktivne organe (Llop i dr. 2010).

Toluen je monoaromatični ugljovodonik sa afinitetom ka tkivima bogatim lipidima, uključujući i centralni nervni sistem (Arnold i dr., 1994). Apsorbovani toluen se distribuira u tkivima bogatim lipidima kao što su mozak, jetra, bubrezi i konačno akumulira unutar adipoznih tkiva. U poređenju sa oralnim unosom, toluen se mnogo brže distribuira nakon inhalacije, a samim tim se i brže raspoređuje u tkivima (Pyykko i dr., 1997; Gospe i Al-Bayati, 1994). Zapaženi efekti uključuju reverzibilne neurološke simptome akutne ekspozicije počev od mučnine, glavobolje i

umanjene manuelne sposobnosti do narkotičnih efekata sa povećanjem nivoa ekspozicije. Degenerativne promene u beloj moždanoj masi kod radnika koji su u stalnom kontaktu sa rastvaračima i jedva primetne promene neuroloških funkcija pamćenja i neuromišićnih karakteristika, gubitak sluha i sposobnosti razlikovanja boja predstavljaju posledice hronične ekspozicije toluenu. Brojne toksikološke studije na laboratorijskim životinjama izloženim toluenu u vazduhu ukazuju na to da toluen nije potencijalni teratogeni agens, ali može usporiti rast fetusa, razvoj skeleta i izazvati promene u ponašanju kod dece (Fan i Alexeeff, 1999).

Sva tri izomerna oblika ksilena pokazuju veoma slične efekte po zdravlje čoveka. Nisu primećeni zdravstveni problemi pri svakodnevnoj ekspoziciji malim koncentracijama ksilena. Kratkoročna izloženost ljudi visokim koncentracijama ksilena može prouzrokovati: iritaciju kože, oči, nosa i grla, teškoće pri disanju, slabljenje funkcije pluća, zakasnele reakcije na vizuelne nadražaje, oslabljeno pamćenje, stomachne tegobe i moguće promene na jetri i bubrezima. Kako kratkoročna tako i dugoročna izloženost visokim koncentracijama ksilena može prouzrokovati štetne efekte na nervni sistem: glavobolje, nedostatak mišićne koordinacije, vrtoglavicu, konfuziju i poremećaj ravnoteže (Eveleth, 1990).

2.4. Sudbina BTEX jedinjenja u životnoj sredini

2.4.1. Transport i raspodela

Transport i raspodela BTEX jedinjenja u životnoj sredini determinisani su pre svega visokom isparljivošću. Benzen je lako isparljiv sa pritiskom pare od 12700 Pa na 25°C, umereno rastvorljiv u vodi, sa rastvorljivošću 1,780 mg/l na 25°C i Henrijevom konstantom (557 Pa·m³/mol na 25°C) koja ukazuje na tendenciju isparljivosti benzena (Mackay i Leinonen, 1975). Zbog umerene rastvorljivosti u vodi, uklanjanje benzena i njegovih homologa iz atmosfere je u manjem obimu moguće i putem vlažne depozicije. Najveći deo BTEX jedinjenja sadržanih u kišnici vратиće se u atmosferu tokom hidrološkog ciklusa.

Sorpcioni koeficijent organskog ugljenika u čvrstoj fazi (logK_{oc}) za benzen kreće se u opsegu 1,78–1,91 (Karickhoff, 1981), za toluen od 1,57–2,25 (Howard, 1990) , za etilbenzen od 2,21–2,39 (Chiou i dr., 1983; Vowles i Mantoura, 1987), za izomere ksilena od 2,11–2,31 (Abdul i dr., 1987) što ukazuje na izuzetnu pokretljivost BTEX jedinjenja u zemljištu i činjenicu da lako

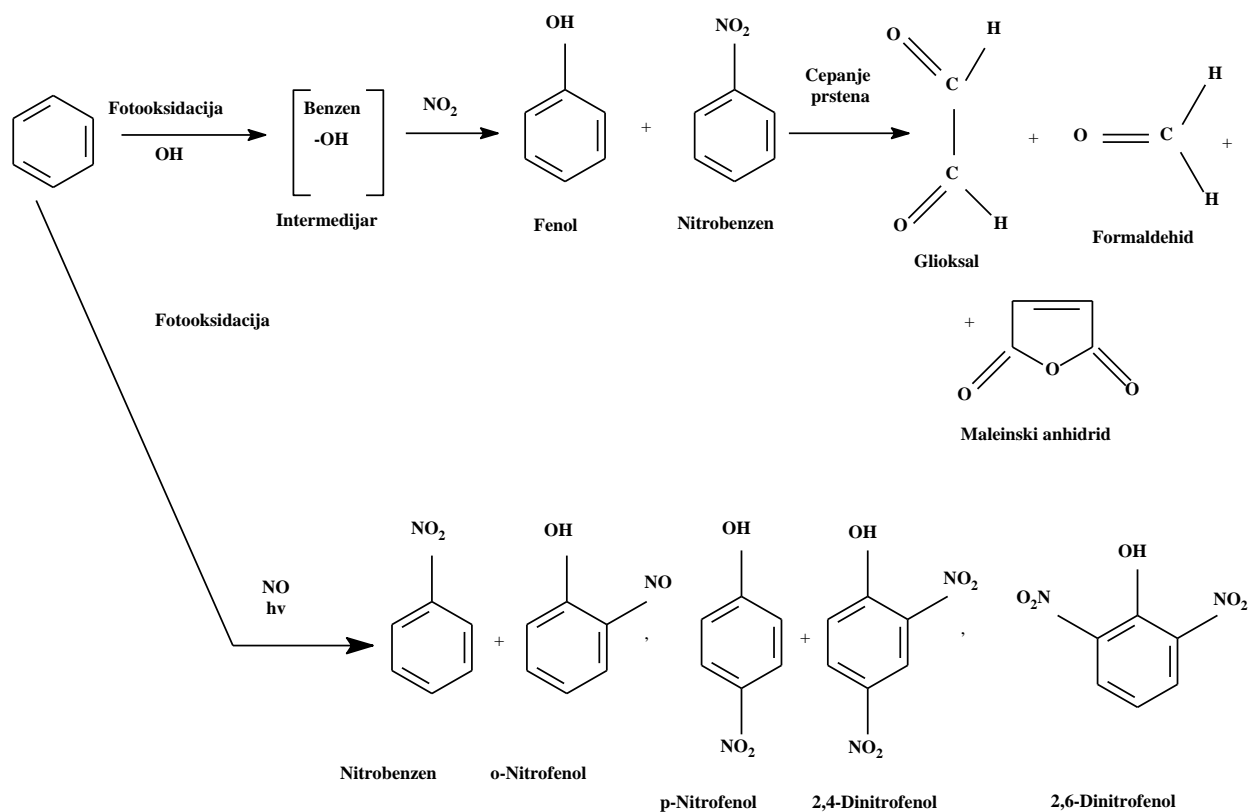
dospevaju u podzemne vode. Ostali parametri koji utiču na potencijal migracije uključuju tip zemljišta, količinu padavina, dubinu podzemnih voda i stepen degradacije. Veća adsorpcija BTEX-a je zabeležena u slučaju povećanja sadržaja organskih materija u zemljištu (Uchrin i Mangels, 1987). Istraživanja mehanizama adsorpcije i desorpcije u zemljištu pokazala su da su potrebni sati za postizanje ravnoteže i da je brzina adsorpcije mnogo veća od brzine desorpcije (Lin i dr., 1994).

Različite studije ukazuju na činjenicu da se BTEX jedinjenja ne akumuliraju u akvatičnim organizmima. Na nizak potencijal bioakumulacije BTEX jedinjenja ukazuju vrednosti koeficijenta raspodele oktanol-voda ($\log K_{ow}$). Vrednost $\log K_{ow}$ za benzen iznosi 2,13 (Gossett i dr., 1983), za toluen 2,72 (Howard, 1990), vrednosti za etilbenzen se kreću u opsegu 3,15-4,34 (Hansch i Leo A, 1979; EPA, 1982), a za ksilen od 3,12-3,2 (Collins i dr., 2000). Na nizak potencijal bioakumulacije ukazuju i niske vrednosti biokoncentracionog faktora (BCF) čije su vrednosti niže od 3,28 za sve komponente BTEX grupe. Takođe ne postoje dokazi o biomagnifikaciji BTEX-a u akvatičnim lancima ishrane.

Kako benzen egzistira primarno u gasnoj fazi, transfer iz vazduha u lišće se smatra glavnim putem kontaminacije biljaka (Hattemer-Frey i dr., 1990). Benzen se akumulira u lišću i plodovima biljaka. Nakon 40 dana biljke koje rastu u sredini koja je bogata benzenom pokazuju bioakumulaciju u lišću i plodovima u većem stepenu u odnosu na koeficijent raspodele benzena u atmosferi (Collins i dr., 2000).

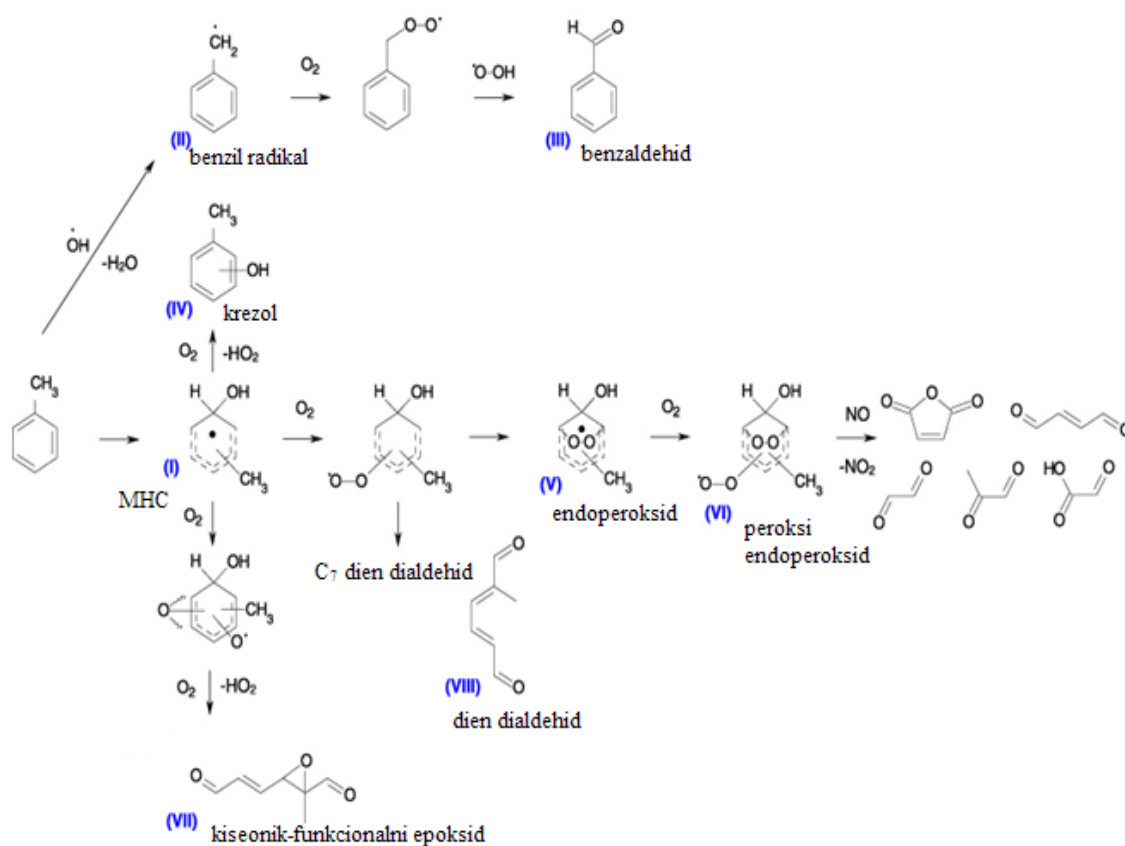
2.4.2. Transformacija i degradacija BTEX jedinjenja u atmosferi

Najznačajniji proces degradacije BTEX jedinjenja u atmosferi predstavljaju reakcije sa hidroksilnim radikalima (Lyman i dr., 1982; Qu i dr., 2006). Konstanta brzine reakcije benzena sa fotohemijски produkovanim hidroksilnim radikalima iznosi $1,3 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{molekula} \cdot \text{s}$, što korespondira vremenu boravka od 8 dana pri koncentraciji hidroksilnih radikala od $1,1 \cdot 10^6 \text{ molekula}/\text{cm}^3$. Sa koncentracijom hidroksilnih radikala od $1 \cdot 10^8 \text{ molekula}/\text{cm}^3$, što odgovara zagađenoj atmosferi, procenjeno vreme boravka je skraćeno na 2,1 čas (Lyman i dr., 1982). Produkti transformacije benzena u vazduhu prikazani su na slici 2.2.



Slika 2.2. Produkti transformacije benzena u vazduhu

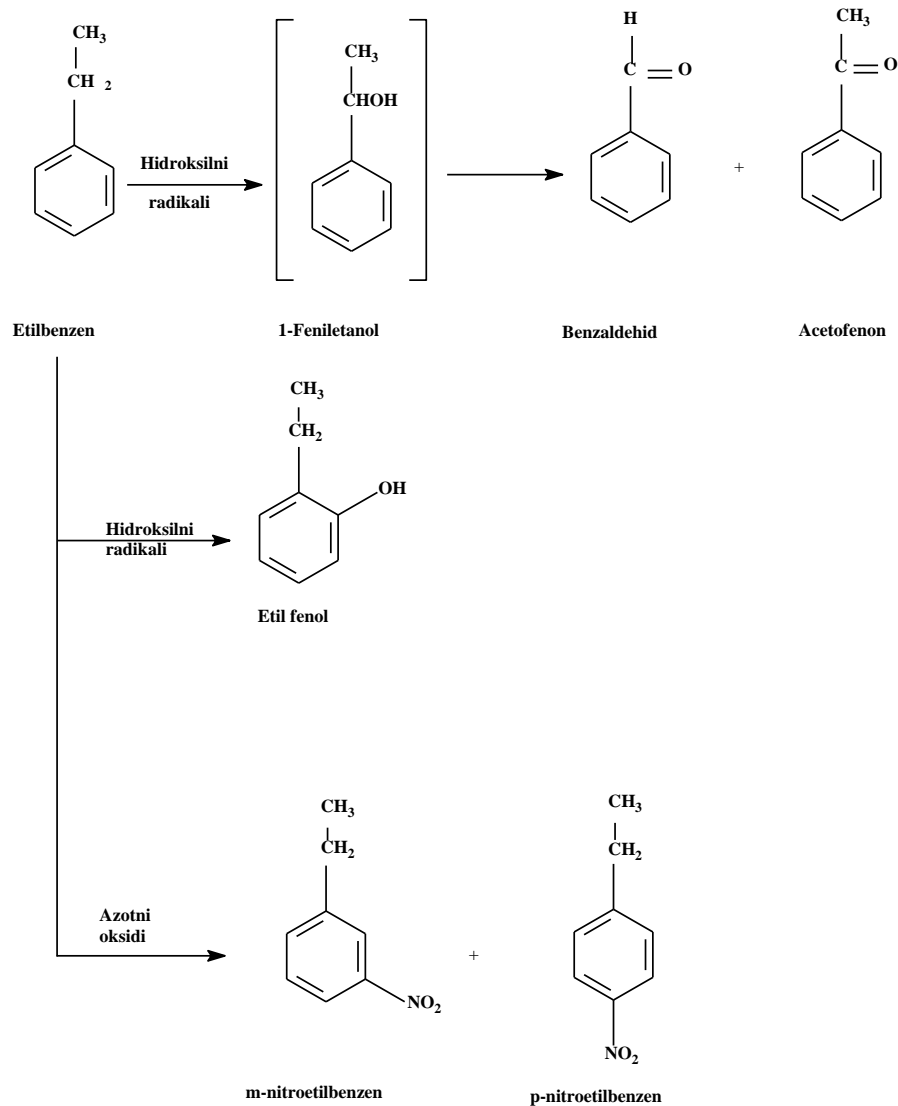
Toluen u atmosferi se razgrađuje u reakciji sa hidroksilnim radikalima, sa karakterističnim vremenom poluživota od 13 časova (ATSDR, 1994), nastaju krezol i benzaldehid koji podležu razaranju aromatičnog prstena pri čemu se dobijaju jednostavniji ugljovodonici (Davis i dr., 1979). Izračunata konstanta brzine ovog procesa je oko $0,6\text{--}2,4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Realno vreme poluživota ovog procesa se kreće u intervalu od 10 do 104 časa u zavisnosti od atmosferskih uslova (Howard i dr., 1991).



Slika 2.3. Produkti transformacije toluena u vazduhu (Hoeben i dr., 2012).

Na slici 2.3 prikazan je proces transformacije toluena u atmosferi u reakciji sa hidroksilnim radikalima. Napad OH radikala na toluen rezultuje nastajanjem metilhidroksicikloheksadienil radikala (MHC, I) ili benzil radikala (II). Daljom oksidacijom benzil radikala dobija se stabilni oksidacioni produkt benzaldehid (III). Moguća su tri izomera MHC radikala, u zavisnosti od pozicije napada OH radikala na toluenov prsten: orto (pozicija 2), para (pozicija 4), dok meta pozicija nije favorizovana. Kiseonik će napasti ugljenikov atom MHC radikala koji nosi nesparen elektron. Pri tom su moguće tri rezonantne strukture u svakoj poziciji. Dalja oksidacija MHC radikala je prilično složena i mogući su sledeći putevi: formiranje krezola (hidroksitoluena, IV), endoperoksida (V), peroksi endoperoksida (VI), kiseonik-funktionalnog epoksida (VII) i dien dialdehida (VIII) (Hoeben i dr., 2012).

Etilbenzen iz parne faze se može ukloniti reakcijom sa hidroksilnim radikalima dobijenim fotohemijskim putem sa poluživotom reakcije od 2 dana. Atmosferska degradacija je mnogo brža tokom letnjih meseci, nasuprot zimskim mesecima, usled više koncentracije hidroksilnih radikala koja tokom letnjih meseci dostiže maksimalne vrednosti (Ravishankara i dr., 1978). Reakcija degradacije je znatno brža u uslovima fotohemijskog smoga. Sporedni produkti oksidacije u reakciji sa hidroksilnim radikalima i oksidima azota uključuju etilfenole, benzaldehid, acetofenon, m- i p-nitroetilbenzen. Osnovni degradacioni proces etilbenzena u atmosferi prikazan je na slici 2.4.



Slika 2.4. Osnovni putevi degradacije etilbenzena u atmosferi (Fan i Alexeeff , 1999).

Eksperimenti sa različitim ugljovodonicima pri formiranju aerosola ili magle povezane sa fotohemijским smogom pokazuju da aromati, kao što je etilbenzen, produkuju manje količine aerosola u poređenju sa reaktivnijim komponentama kakve su na primer alkeni (O'Brien i dr. 1975). Formiranje PAN povezano je sa fotoreaktivnošću ugljovodonika koji učestvuju u reakciji. U poređenju sa drugim atmosferskim ugljovodonicima etilbenzen pokazuje slabiju fotoreaktivnost u odnosu na toluen ili alkene kao što je na primer propen, dok je u odnosu na više aromate fotoreaktivnost etilbenzena znatno veća (Yanagihara i dr., 1977).

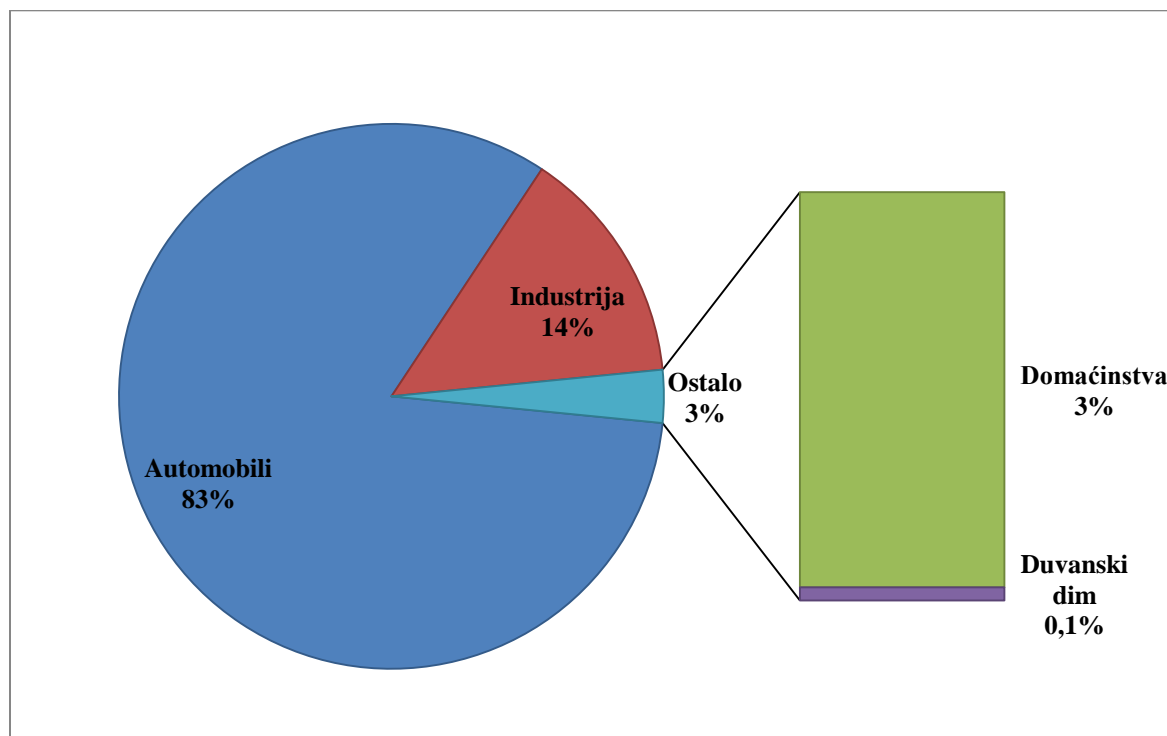
Transformacije ksilena u reakciji sa hidroksilnim radikalima dominiraju u odnosu na reakcije sa ozonom (vreme poluživota 3-78 godina) i nitratnim radikalima (vreme poluživota 80-220 dana) (Atkinson i Carter, 1984). Izračunato vreme poluživota ksilena u vazduhu je od 8-14 časova pri koncentraciji hidroksilnih radikala od $5 \cdot 10^5$ molekula/cm³ (Atkinson, 1990).

Moguće su reakcije BTEX-a i sa drugim oksidantima u atmosferi kao što su nitratni radikali i ozon, mada je brzina degradacije u poređenju sa reakcijom sa hidroksilnim radikalima zanemarljiva (Wei i Adelman, 1969; Qu i dr., 2006). Vreme poluživota od 472 godine za ruralne atmosfere i 152 godine za urbane atmosfere određene su za reakciju benzena sa ozonom korišćenjem konstante brzine reakcije za ozon od $7 \cdot 10^{-23}$ cm³/molekul·s (Pate i dr., 1976) i atmosferske koncentracije ozona od $9,6 \cdot 10^{11}$ molekula/cm³ za ruralne i $3 \cdot 10^{12}$ molekula/cm³ za urbane sredine (Lyman i dr., 1982). Prisustvo aktivnih vrsta kao što su oksidi azota i sumpor dioksid utiče na povećanje brzine procesa fotodegradacije BTEX jedinjenja. Neki od produkata reakcije benzena sa azot(II)-oksidom (na primer nitrobenzen, o-, p- nitrofenol, i 2,4- i 2,6-dinitrofenol) mogu uzrokovati štetne efekte po zdravlje ljudi (Nojima i dr., 1975). Relativno kratko vreme poluživota u atmosferi ograničava vreme potencijalne ekspozicije pomenutim komponentama.

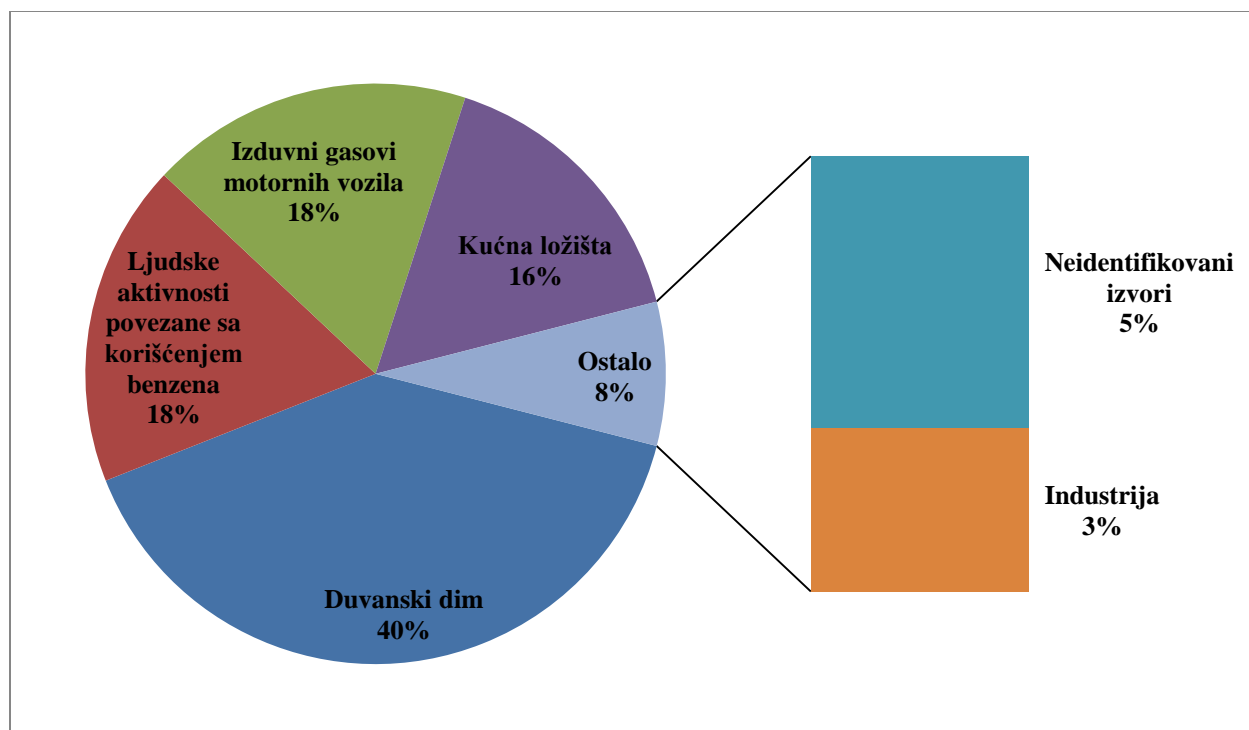
BTEX jedinjenja podležu reakcijama indirektnе fotolize. Direktnа fotoliza BTEX-a u atmosferi nije verovatna zato što gornji slojevi atmosfere efektivno filtriraju i odstranjuju talasne dužine svetlosti manje od 290 nm, a BTEX jedinjenja ne apsorbuju talasne dužine svetlosti veće od 260 nm (Bryce-Smith i Gilbert, 1976).

2.5. Izvori BTEX jedinjenja u životnoj sredini

Studije TEAM (The Total Exposure Assessment Monitoring Studies) sprovedene od strane EPA između 1980. i 1990. godine, ukazuju na činjenicu da su najznačajniji izvori kontaminacije mali po obimu i da se nalaze u neposrednom okruženju ispitivane populacije. Zaključak koji proizilazi iz studije je da *veličina izvora emisije i obim ekspozicije* nisu u korelaciji. TEAM studije ukazuju da je blizu 85% atmosferskog benzena produkovano sagorevanjem fosilnih goriva od strane automobila i zagrevanjem domaćinstava, a da preostalih 15% potiče od industrije, slika 2.5. Količina benzena emitovana putem duvanskog dima predstavlja svega 0,1% ukupne godišnje emisije. Nasuprot činjenici da naftni produkti najviše doprinose povećanju količine benzena u atmosferi nalazi se podatak da skoro polovina ukupne ekspozicije benzenu, kada je reč o ljudskoj populaciji, potiče od duvanskog dima (Wallace, 1995), slika 2.6. Merenja koncentracionih nivoa benzena u dahu pušača sprovedenih od strane EPA identifikovalo je pušenje kao dominantan izvor ekspozicije benzenu za oko 40 miliona američkih pušača (Riveles i dr., 2005). Čak i pasivno izlaganje duvanskom dimu je odgovorno za veću izloženost uticaju benzena (oko 5 % od ukupne) nego emisija celokupnih industrijskih kapaciteta SAD (3% od ukupne) (Wallace, 1995).



Slika 2.5. Emisija benzena u životnu sredinu u SAD (Wallace, 1995).



Slika 2.6. Ekspozicija opšte populacije benzenu u SAD (Wallace, 1995).

Na slikama 2.5 i 2.6 je prikazana komparacija emisije i ekspozicije benzenu. Osnovni razlog što tako mali izvor emisije ostvaruje tako veliki efekat predstavlja direktan tip ekspozicije. Prema Volasu jedna cigareta emituje količinu od 55 μg benzena sa blizu 100% efikasnosti uticaja na pušača, dok je benzen iz industrijskih i mobilnih izvora dispergovan u atmosferi (Wallace, 1995).

Ljudske aktivnosti povezane sa automobilima, kao što je sama vožnja ili dopunjavanje goriva, predstavljaju veoma značajne izvore ekspozicije benzenu (Hoffmann i dr, 2000). Praktično sve emisije benzena, oko 99,9%, na kraju dospevaju u vazduh usled čega dolazi do povećane ekspozicije ljudske populacije kroz inhalaciju kontaminiranog vazduha, posebno u zonama opterećenih gustim saobraćajem i u blizini benzinskih stanica. Benzen čini 1-2% većine benzinskih mešavina, samim tim predstavlja neizostavni konstituent automobilskih emisija. Sve dok je benzen konstituent automobilskih izduvnih gasova i benzinskih isparenja ljudi koji provode više vremena u automobilima, posebno u zonama opterećenim gustim saobraćajem, poseduju povećanu ličnu ekspoziciju benzenu (Karakitsios i dr., 2007; Esteve-Turrillas i dr., 2007). Prema podacima studije Volasa proračunati unos benzena za vožnju u automobilu je 40 μg /dan za ekspoziciju u trajanju od 1 sat/dan (Wallace, 1989). Dopunjavanje benzina takođe

predstavlja značajan izvor ekspozicije benzenu. Studija izvedena između jula 1998. i marta 1999. godine uključila je 39 korisnika benzina na benzinskim stanicama sa samoposluživanjem u Severnoj Karolini. Meren je nivo benzena u vazduhu u blizini benzinskih stanica, kao i nivoi benzena u dahu korisnika pre i odmah nakon punjenja (Egeghy i dr. 2000). Koncentracioni nivoi benzena u vazduhu u okolini benzinskih stanica su detektovani u opsegu od 0,02 do 11,16 ppm sa srednjom vrednošću od 0,91 ppm. Interval koncentracija benzena detektovanih u dahu korisnika pre punjenja bio je u opsegu od 0,001– 0,022 ppm sa srednjom vrednošću od 0,027 ppm, dok je interval koncentracionih nivoa benzena u dahu konzumenata nakon dopunjavanja rezervoara bio od 0,001-0,434 ppm sa srednjom vrednošću od 0,05 ppm (Egeghy i dr. 2000). Studija Bonda i saradnika objavila je koncentraciju benzena od čak 1 ppm u dahu osobe koja sipa benzin (Bond i dr., 1986). Koristeći ovu koncentraciju i procenu da se 70 minuta godišnje provodi u sipanju benzina, proračunat je unos benzena od 10 µg/dan (Wallace, 1989).

Značajan izvor ekspozicije benzenu predstavljaju kućna ložišta (slika 2.6), odnosno korišćenje peći na ugalj i drva u domaćinstvima (Wallace, 1995). Za benzen je nađeno da predstavlja značajnu komponentu sagorevanja drveta (10-20% ukupnih nemetanskih ugljovodonika) (Wallace, 1989). Ostale izvore emisije predstavljaju odlagališta opasnog otpada, odnosno vazduh u blizini takvih lokacija, industrijska postrojenja i isparavanja iz kontaminiranih voda. Prosečan unos benzena putem pijaće vode je 0,2 µg/dan pod pretpostavkom da je koncentracija benzena u pijaćoj vodi 0,1 µg/dm³ i da se konzumira oko 2 l vode dnevno.

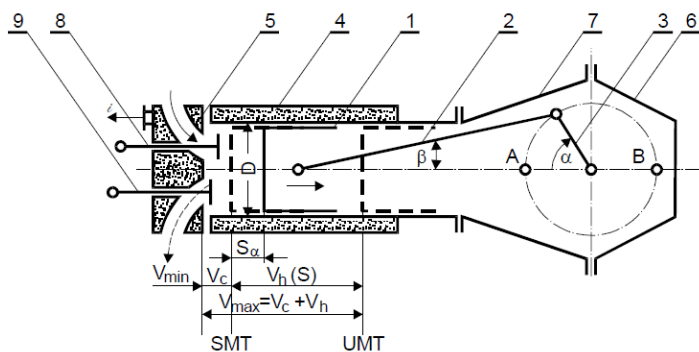
3. MOTORI SUS

Motori predstavljaju mašine koje pouzdano i ekonomično pretvaraju različite vidove energije u mehaničku. Zavisno od oblika polazne energije motori mogu biti: toplotni, električni, hidraulični i drugi. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS) spadaju u grupu toplotnih motora, jer se toplotna energija hemijski vezana u gorivu, sagorevanjem pretvara u potencijalnu energiju radnog fluida, a zatim ekspanzijom radnog fluida u korisnu mehaničku energiju.

3.1. Stvaranje smeše kod Oto motora

Pripremljena smeša gorivo-vazduh se pali električnom varnicom u cilindrima motora za vreme taktova sabijanja. Cilj je da se svaki cilindar motora napuni takvom smešom goriva i vazduha koja se može zapaliti i ekonomično sagorevati bez štetnih posledica po motor. U idealnom slučaju smeša mora biti potpuno homogena i gorivo se mora nalaziti u gasovitom stanju. Za pravilan rad motora veoma je važan odnos goriva i vazduha u smeši, jer gorivo se može zapaliti i goreti samo u slučaju kada se pomenuti odnos nalazi u određenim granicama (Filipović, 2006).

Motori sa unutrašnjim sagorevanjem se široko primenjuju u mnogim oblastima ljudske aktivnosti, što je uslovalo razvijanje mnogobrojnih tipova i konstrukcija. Vodeći računa da se pod pojmom motora sa unutrašnjim sagorevanjem podrazumevaju klipni motori SUS, prikazana je principijelna šema jednog takvog motora (slika 3.1).



Slika 3.1. Šema motora sa unutrašnjim sagorevanjem: 1. Klip, 2. Klipnjača, 3. Kolenasto vratilo (radilica), 4. Cilindar, 5. Cilindarska glava, 6. Karter (donji deo motorne kućice), 7. Gornji deo motorne kućice, 8. Usisni ventil, 9. Izduvni ventil (Filipović, 2006).

Kod svih klipnih motora osnovna konstruktivna koncepcija i princip rada su u suštini isti. Osnovni elementi motora SUS su cilindar 4, u kome se kreće klip 1, vezan posredstvom klipnjače 2 za kolenasto vratilo 3. Radni prostor formira se od cilindra 4, koji je sa jedne strane zatvoren cilindarskom glavom 5, u kojoj se nalaze usisni 8 i izduvni ventil 9, a sa druge strane samim pomerljivim klipom. Klip, klipnjača i kolenasto vratilo čine glavni motorni mehanizam čiji je zadatak da pravolinijsko oscilatorno kretanje klipa, nastalo kao rezultat ekspanzije produkata sagorevanja, pretvore u obrtno kretanje kolenastog vratila. Na taj način se mehanički rad predaje preko kolenastog vratila u vidu obrtnog momenta (Čokorilo, 2009).

Radni ciklus se ostvaruje u cilindru motora ponavljanjem niza uzastopnih širenja određenih količina radne materije između krajnjih položaja klipa. Položaji u kojima se menja smer kretanja klipa nazivaju se mrtvim tačkama. Krajnji položaj, pri kome je rastojanje od klipa do ose kolenastog vratila najveće, naziva se spoljna mrtva tačka (SMT). Pri tom položaju klipa zapremina između klipa i cilindarske glave je minimalna i naziva se kompresiona zapremina (V_C) ili prostor sagorevanja. Krajnji unutrašnji položaj, kada je klip najbliži osi kolenastog vratila, predstavlja unutrašnju mrtvu tačku (UMT). Maksimalna zapremina iznad klipa ostvaruje se prilikom dostizanja UMT (V_{max}). Pomeranja klipa iz jedne u drugu mrtvu tačku predstavlja hod klipa (S). Hod klipa (S) jednak je dvostrukom poluprečniku puta ose kolena kolenastog vratila. Takt motora je deo radnog procesa koji se obavi za jedan hod klipa. Zapremina, V_h , koju opiše čelo klipa pri kretanju od jedne do druge mrtve tačke naziva se radna zapremina cilindra. Na taj način ukupna zapremina cilindra V_{max} je jednaka sumi radne zapremine (V_h) i kompresione zapremine (V_C). Odnos ekstremnih zapremina, definiše stepen kompresije ε :

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_C} = \frac{V_h + V_C}{V_C} = 1 + \frac{V_h}{V_C} \quad (3.1)$$

Stepen kompresije (sabijanja) pokazuje u kolikom odnosu je izvršeno sabijanje radne materije, odnosno pri poznatoj radnoj zapremini definiše prostor sagorevanja. Pored osnovnih delova motor ima još čitav niz pomoćnih sistema koji omogućuju nesmetan rad motora SUS pri svim uslovima eksploatacije (Stefanović, 2010).

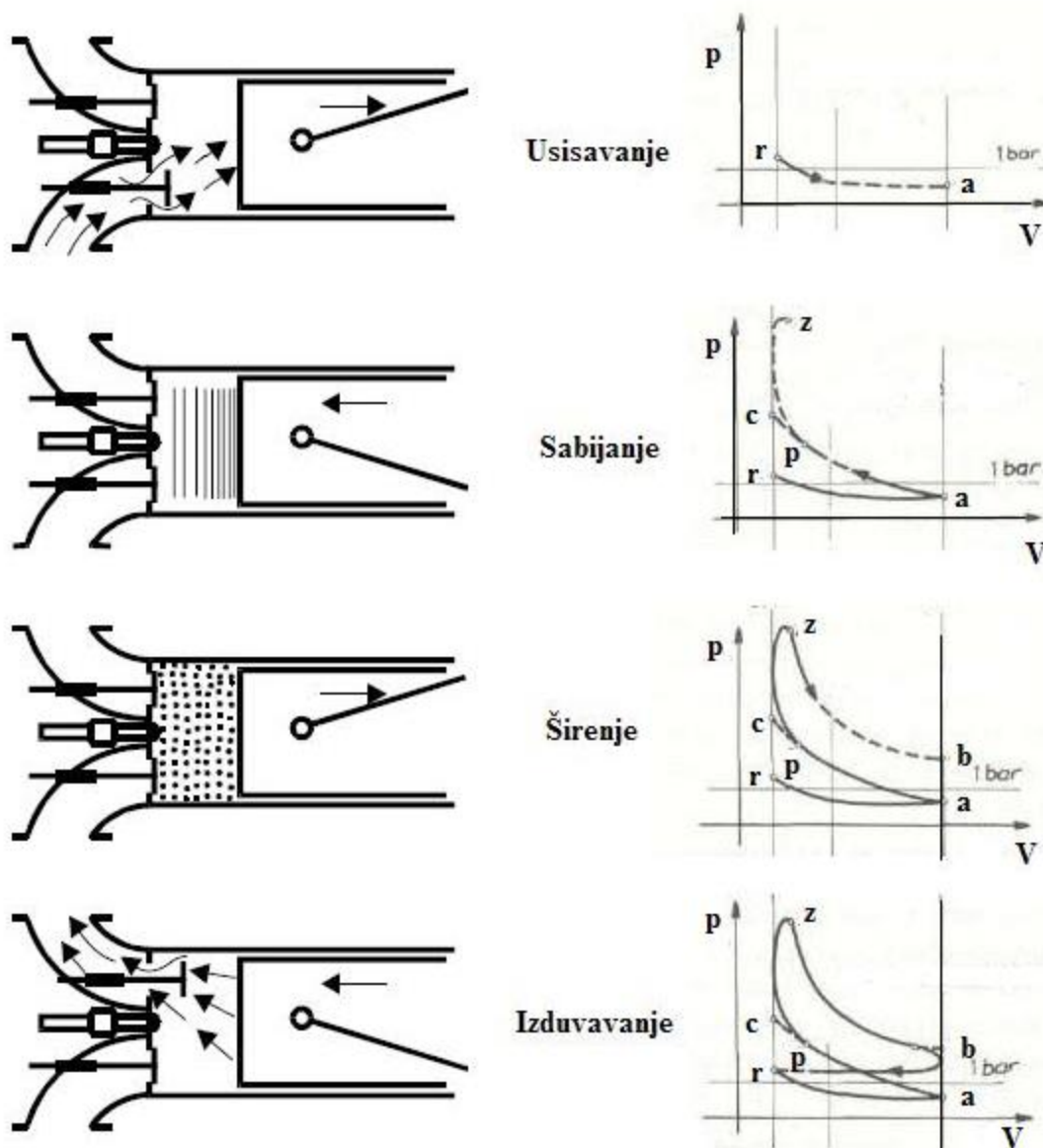
Svi motori SUS po načinu ostvarivanja radnog ciklusa mogu se podeliti u dve osnovne grupe: četvorotaktne i dvotaktne. Kod četvorotaktnih motora radni ciklus se ostvari u toku četiri takta,

odnosno hoda klipa, čemu odgovaraju dva obrtaja kolenastog vratila. Dvotaktni motori radni ciklus obave za dva hoda klipa, čemu odgovara jedan obrtaj kolenastog vratila (Stefanović, 2010).

Kod Oto motora unapred pripremljena smeša se pali električnom varnicom, koja se u pogodnom trenutku stvara između elektroda svećice.

Prema načinu punjenja cilindra radnom materijom, svi motori se dele na motore sa prirodnim i veštačkim punjenjem. Kod motora sa prirodnim punjenjem, punjenje se ostvaruje na osnovu podpritiska u cilindru motora, stvorenog pri kretanju klipa od spoljne ka unutrašnjoj mrtvoj tački. Kod veštački punjenih motora, radna materija se predhodno sabija, kako bi se omogućilo povećanje snage motora i zatim šalje u cilindar. SUS motori spadaju u motore sa niskim stepenom kompresije.

Pri radu motora SUS u cilindrima se odvijaju radni ciklusi koji obuhvataju niz uzastopnih promena stanja kojima je podvrgnut radni fluid. Krajnji cilj je da se dovedena toplota, dobijena sagorevanjem goriva, sa što boljim stepenom efikasnosti konvertuje u mehanički rad na izlazu motora (He i dr., 2011). Radni ciklus motora SUS obuhvata sledeće procese: punjenje cilindra svežim radnim fluidom, sabijanje radnog fluida, sagorevanje i širenje produkata sagorevanja i izbacivanje produkata sagorevanja iz cilindra, kao što je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2. Taktovi radnog ciklusa četvorotaktnog motora (Filipović, 2006).

I takt-uisavanje

Linija usisavanja započinje od tačke *r*, završne tačke prethodnog radnog ciklusa kojoj odgovara pritisak izduvavanja. Kretanjem klipa od SMT ka UMT, u cilindru se stvara podpritisak koji omogućava usisavanje smeše goriva i vazduha. Pri tome je otvoren usisni, a zatvoren izduvni ventil, kako se izduvni gasovi iz prethodnog ciklusa ne bi vraćali u cilindar. Pritisak usisavanja je nešto niži od atmosferskog, te je linija usisavanja *r-a* (slika 3.2).

II takt-sabijanje

Sabijanje nastaje pri kretanju klipa od UMT ka SMT. U tom periodu su oba ventila zatvorena, te kretanje klipa povećava pritisak gorive smeše. Na dijagramu, prikazanom na slici 3.2, proces sabijanja je pretstavljen krivom a-c. U blizini SMT celokupna radna materija je sabijena u prostor sagorevanja V_c , te su odgovarajući pritisci i temperature veoma visoki. Veličina pritiska na kraju procesa sabijanja zavisi u osnovi od stepena kompresije, odnosno od vrste motora. Kod Oto motora zbog opasnosti samopaljenja gorive smeše i pojave detonacije ograničena je vrednost stepena kompresije, a samim tim i vrednost pritiska i temperature na kraju procesa kompresije. Uobičajene vrednosti stepena kompresije kod Oto motora se kreću od 6 do 9, pritisaka od 6 do 12 bar i temperatura od 300 do 400°C. Nešto pre SMT, u tački p, dolazi do paljenja gorive smeše električnom varnicom. Proces sagorevanja se obavlja u neposrednoj blizini SMT, pri čemu pritisak naglo raste po liniji p-z, dostižući u tački z maksimalnu vrednost (kod Oto motora od 25 do 50 bar). Sagorevanjem se oslobađa znatna količina toplote tako da temperatura produkata sagorevanja dostiže i do 2000°C. Proces sagorevanja u motoru, u zavisnosti od osobina goriva i brzohodnosti motora, traje od 10^{-2} do 10^{-3} sekundi. Zbog toga je i potrebno da se omogući što bolja priprema gorive smeše, što homogeniji i raspršeniji sastav, kako bi se omogućilo da svaki molekul goriva dobije dovoljnu količinu vazduha, odnosno kiseonika za potpuno sagorevanje.

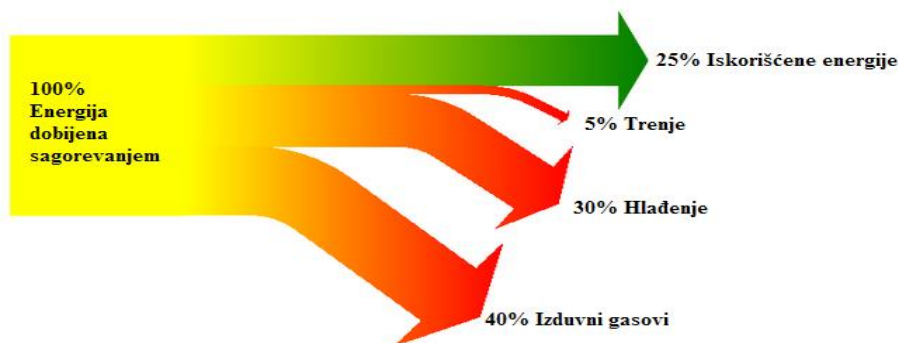
III takt-širenje (ekspanzija)

Proces sagorevanja se završava u tački z, nešto iza SMT, na početku takta širenja. Energetski opterećeni produkti sagorevanja potiskuju klip ispred sebe, pri čemu dolazi do širenja produkata sagorevanja, povećanja zapremine i pada pritiska. Potiskivanjem klipa ostvaruje se rad koji se putem motornog mehanizma predaje kolenastom vratilu i dalje potrošačima. Ovo je jedini radni takt koji omogućuje pokrivanje sopstvenih gubitaka motora tokom ostala tri takta i predaju mehaničke energije potrošačima. Proces se odvija po liniji z-b. U toku takta ekspanzije zatvorena su oba ventila.

IV takt-izduvavanje

Nešto pre dolaska klipa u UMT otvara se izduvni ventil, te dolazi do pada pritiska produkata sagorevanja, kako bi se nastali produkti odstranili pod što manjim pritiskom. U toku takta izduvavanja klip se kreće od UMT ka SMT potiskujući energetske iskorišćene produkte sagorevanja u izduvni vod, a zatim u spoljnu atmosferu. Na dijagramu proces izduvavanja je predstavljen krivom b-r, sa pritiskom koji je nešto viši od atmosferskog (1,05 do 1,25 bar), te je za izduvavanje gasova potrebno utrošiti izvestan rad.

Pri daljem kretanju klipa započinje novi radni ciklus. Rad četvorotaktnog motora se sastoji u periodičnom ponavljanju radnih ciklusa. Odvijanje svih faza ciklusa praćeno je odgovarajućim gubicima, koji predstavljaju rezultat velikog broja različitih uticaja. Intenzitet i različitost uticaja otežavaju matematičko modelovanje realnih ciklusa u samom motoru. Usled složenosti odvijanja stvarnih ciklusa, pristupa se uvođenju uprošćenih (teorijskih) ciklusa, koji u obzir uzimaju samo najuticajnije činioce. Jedan od najvećih nedostataka današnjeg koncepta rada motora jesu veliki nepovratni toplotni gubici nastali zračenjem celokupne konstrukcije motora i izduvnih gasova, koji sa sobom odnose veliku količinu toplotne energije, slika 3.3.



Slika 3.3. Tok energije kod Oto motora (Dorić, 2012).

Današnji benzinski motori koriste svega oko 25% uložene energije, dok konstrukcije dizel motora imaju nešto veći stepen iskorišćenja, od oko 30% (Dorić, 2012). S obzirom na evidentne klimatske promene i današnje tendencije ka što efikasnijem korišćenju energije, nema sumnje da će i dalji razvoj motora SUS teći u pravcu poboljšanja efikasnosti u cilju očuvanja i unapređenja životne sredine.

3.2. Sagorevanje

3.2.1. Pogonska goriva

Osnovne hemijske konstituente tečnih i gasovitih goriva čine ugljovodonici različitih osobina. Sagorevanje goriva kod motora SUS se odvija u cilindru motora. Prilikom sagorevanja dolazi do reakcije ugljenika i vodonika sa kiseonikom iz vazduha uz istovremeno oslobađanje znatne količine toplote (Ra i Reitz, 2011; Flagan i Seinfeld, 1988). Proces sagorevanja goriva predstavlja osnovni izvor emisije BTEX jedinjenja u atmosferski kompartiment prilikom kretanja motornih vozila, zbog toga je neophodno u potpunosti sagledati prirodu procesa sagorevanja u motorima SUS i unaprediti ga u cilju smanjenja emitovanih količina toksičnih i kancerogenih jedinjenja iz grupe BTEX.

Goriva za motore SUS karakteriše:

- Visoka toplotna moć, kako bi se sa što manjom količinom goriva postigli što bolji efekti.
- Dobra isparljivost, kako bi se omogućilo brzo i lako mešanje sa vazduhom u cilju stvaranja gorive smeše.
- Da ne sadrže komponente koje omogućavaju koroziju pri skladištenju, odnosno da prilikom sagorevanja ne stvaraju štetne supstance, kao ni suspendovane materije.
- Postojanost pri transportu i skladištenju, naročito pri niskim temperaturama.
- Velika brzina sagorevanja, ali bez propratnih detonatnih pojava.
- Postojanost i otpornost na detonaciju (kod Oto motora), odnosno sklonost ka samoupaljenju (kod dizel motora).
- Mogućnost sigurnog snabdevanja potrošača, pri svim temperaturama.

Kod motora SUS najviše se koriste tečna goriva, jer najbolje zadovoljavaju sve neophodne zahteve. Tečna goriva, dobijena rafinacijom nafte, sadrže veliku količinu hemijski vezane energije, lako se mešaju sa vazduhom stvarajući homogenu gorivu smešu i imaju veliku brzinu sagorevanja. U zavisnosti od potrebe za različitim količinama pojedinih frakcija, primenjuje se odgovarajući postupak prerade nafte. Gasovita goriva su pogodna za korišćenje u motorima SUS, jer se lako mešaju sa vazduhom, sagorevaju praktično bez ostataka suspendovanih čestica,

obezbeđuju brzo i lako startovanje, ali su nepogodna za transport i skladištenje, pa samim tim i za sigurno snabdevanje potrošača, te zbog toga nemaju toliko veliku primenu u poređenju sa tečnim gorivima. Od gasovitih goriva mogućnost primene imaju: gasogeneratorski gas, svetleći gas i tečni gasovi propan i butan.

U Oto motorima najviše se koristi benzin. Benzin predstavlja najisparljiviji destilat nafte i karakteriše se sadržajem komponenti čije temperature ključanja ne prelaze 200°C. Donja toplotna moć benzina je oko 45000 kJ/ kg. Važna osobina benzina je isparljivost, čak i na niskim temperaturama. Isparljivost utiče na brzinu i kvalitet pripreme smeše, što je veoma značajno pri obezbeđivanju povoljnih uslova za pouzdan start motora. Pri normalnom sagorevanju benzina u cilindru motora, brzina prostiranja plamena iznosi od 25 do 40 m/sec. Veća brzina sagorevanja doprinosi poboljšanju odvijanja radnog ciklusa, a samim tim i vrednosti stepena korisnosti. Pri povećanju stepena sabijanja radne smeše brzina prostiranja fronta plamena može naglo da poraste i na taj način dovede do pojave detonacije. Detonacija predstavlja burno sagorevanje jednog dela smeše koji se nalazi ispred fronta plamena, pri čemu dolazi do povećanja brzine sagorevanja čak do 2000 m/sec. Usled visokog pritiska dolazi do sudaranja dva fronta plamena, jednog koji potiče od varnice i drugog koji potiče od samopaljenja. Sudar dva fronta plamena čuje se kao kucanje u motoru. Udari, izazvani poremećenim uslovima sagorevanja, mogu da dovedu i do loma pojedinih elemenata motora. Kod detonantnog sagorevanja dolazi do velike predaje pritiska, koja se poredi sa udarom čekića u klip motora. Predaje se i velika količina toplote, što utiče na lokalno pregrevanje. Čelo klipa pri tom trpi termičku eroziju, a udarna opterećenja se preko osnovice klipa prenose na klipnjaču, a potom i na kolenasto vratilo (Čokorilo 2009).

Otpornost goriva, prema pojavi detonacije se definiše oktanskim brojem. Oktanski broj predstavlja i merilo otpornosti smeše ka samopaljenju. Za merenje otpornosti goriva prema detonaciji, odnosno za određivanje vrednosti oktanskog broja koriste se posebni jednocilindrični motori kod kojih je moguće u toku ispitivanja menjati stepen kompresije. Pri tome se kao etalon gorivo koristi smeša izooktana C_8H_{18} , koji je veoma otporan prema detonaciji (oktanski broj 100) i normalnog heptana C_7H_{16} koji je potpuno neotporan prema detonaciji (oktanski broj 0). Vrednost oktanskog broja goriva predstavlja sadržaj izooktana u zapreminskim procentima one smeše, koja je po detonacionim svojstvima ista kao i ispitivano gorivo (Salazar, 1998). Što je viši

oktanski broj ispitivano gorivo je otpornije prema detonaciji, samim tim moguć je veći stepen sabijanja (Hunter Mack i dr., 2014). Za povećanje oktanskog broja benzina se dodaju specijalne supstance tzv. antidetonatori (tetraetil-, tetrametil-olovo). Izbacivanjem iz upotrebe alkilnih derivata olova, u svrhu povećanja oktanskog broja danas se koriste aromatična jedinjenja. Aromati imaju visok energetska sadržaj i utiču na nižu potrošnju. Smeša ugljovodonika i aditiva povećava oktanski broj i otpornost smeše ka detonantnom sagorevanju. Povećanjem sadržaja aromatičnih jedinjenja u sastavu benzina oktanski broj prelazi vrednost 100. Na taj način je omogućen veći stepen sabijanja, veća ekonomičnost i snaga motora. Visok stepen kompresije zahteva visok oktanski broj goriva. Gorivo veće oktanske vrednosti ne može naškoditi motoru.

Specifične osobine benzina su: *temperatura samozapaljenja* (temperatura do koje treba zagrejati gorivo u prisustvu vazduha, da bi se zapalilo samo od sebe i dalje sagorevalo) i *granice upaljivosti* (donja granica siromaštva- kada je smeša toliko razređena vazduhom da ne postoji mogućnost upaljenja i gornja granica bogatstva- kada je smeša toliko bogata da ne postoji dovoljno kiseonika za sagorevanje). Kod Oto motora je veoma važna temperatura samopaljenja, kako se u procesu sabijanja ne bi stvorila mogućnost samoupaljenja gorive smeše ili pojava detonacije ispred fronta plamena. Vrednost temperature samopaljenja za benzin iznosi oko 500°C (Papić i dr. 2010).

Postojanost benzina kod niskih temperatura je veoma velika. Tek ispod -100°C nastupa promena agregatnog stanja. Ukoliko se voda nalazi u benzinu dolazi do smanjenja postojanosti na niskim temperaturama. Pored toga voda deluje korozivno i agresivno na konstrukcione materijale motora i pomoćnih agregata. Prisustvo sumpora u benzinu veoma štetno deluje na motor, naročito u sistemu za dovod goriva i uređajima za naknadnu obradu emisije, zbog čega sadržaj sumpora u benzinu ne bi smeo da pređe 0,2 % (Papić i dr. 2010).

3.2.2. Fizički aspekt procesa sagorevanja

Front plamena, tokom sagorevanju, u cilindru motora se kreće promenljivom brzinom. Brzina je manja na početku sagorevanja u blizini svećica i pored hladnijih zidova. Nakon kratkog vremena od "skakanja" varnice, tokom perioda *pritajenog sagorevanja*, oko svećice se formira stabilno jezgro sagorevanja od koga se sagorevanje širi frontalno, u svim pravcima, rastućom brzinom. Gubici toplote u početnom stadijumu sagorevanja oko svećice su prilično veliki. Ukoliko

energija električne varnice nije dovoljna ili sagorevanje teče suviše sporo može doći do gašenja plamena. Nakon perioda pritajenog sagorevanja sledi period *glavnog sagorevanja*, uspostavljanjem stabilnog fronta plamena u kome je dostignuta dovoljno visoka temperatura za odvijanje hemijskih reakcija sagorevanja i pripremanje susednih slojeva za sagorevanje. Poslednju fazu predstavlja *dogorevanje goriva*, koje nije obuhvaćeno sagorevanjem u prethodnoj fazi, što se odnosi na delove smeše u blizini hladnijih zidova i delove osiromašene smeše gorivo/vazduh (Dorić, 2012; Amr i Bari, 2009).

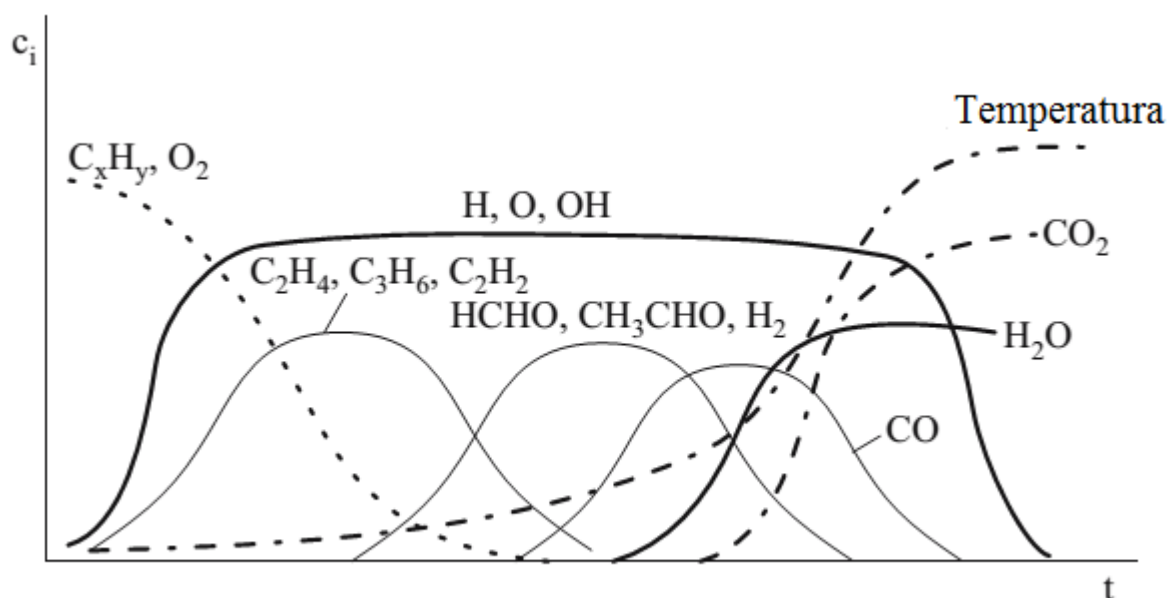
Da bi se proučio uticaj opterećenja na dužinu procesa sagorevanja, treba imati u vidu da se kod konvencionalnog motora opterećenje menja sa promenom poprečnog preseka u usisnom kolektoru. Putem gušenja na leptiru, pri istom broju obrtaja u cilindru se usisava manja količina smeše, čijim se sagorevanjem oslobađa manja količina toplote, pa je i manja razvijena snaga pri datim uslovima. Količina zaostalih produkata sagorevanja u cilindru, nakon izmene radne materije ostaje praktično ista, bez obzira na opterećenje, usled čega se procenat zaostalih gasova u radnoj materiji povećava sa obaranjem opterećenja motora. Produkti sagorevanja umanjuju brzinu sagorevanja. Rezultati eksperimentalnih istraživanja pokazuju da zaostali produkti sagorevanja produžavaju fazu pritajenog sagorevanja, dok na fazu glavnog sagorevanja utiču u manjoj meri. Pri velikom procentu zaostalih gasova dolazi do sužavanja granica upaljivosti radne smeše (Heywood, 1988).

Oto motori rade sa homogenom smešom i sagorevanje se odvija širenjem plamena kroz komoru za sagorevanje. Pri tome je od presudnog značaja da sagorevanje bude što potpunije. Kvalitet sagorevanja zavisi od uslova formiranih pre početka sagorevanja kao i od uslova koji prate sam process sagorevanja.

3.2.3. Hemijski aspekt procesa sagorevanja ugljovodonika

Sagorevanje ugljovodonika u motorima SUS predstavlja kompleksan hemijski proces koji je nepotpuno opisan u literaturi. Veliki broj hemijskih reakcija paralelno i sukcesivno se odigrava u veoma kratkom vremenskom period (Merker i dr., 2006).

Prvu fazu procesa karakteriše formiranje ugljovodoničnih peroksida (ROOH), koji dehidrogenacijom formiraju niže alkane. Preko sekvencijalnih reakcija sa atomima vodonika ($H\cdot$), kiseonika ($O\cdot$) i hidroksilnim radikalima ($OH\cdot$) prvo se formiraju niži alkeni, a potom i aldehidi (formaldehid (HCHO), acetaldehid (CH_3CHO)). Tokom formiranja aldehida uneta je samo jedna desetina ukupne energije koja će biti oslobođena do kraja procesa sagorevanja. Formiranje aldehida je praćeno hladnim plamenom. U zoni hladnog plamena formiraju se produkti nepotpunog sagorevanja (CO , H_2 , H_2O), da bi se konačno u vrelom plamenu formirali ugljen-dioksid i voda (CO_2 , H_2O) kao krajnji produkti procesa sagorevanja. Tokom oksidacije ugljovodonika i formiranja ugljen-monoksida oslobađa se oko 30% ukupne energije. Preostala energija se oslobađa tokom oksidacije CO i formiranja CO_2 , slika 3.4.



Slika 3.4. Tok oksidacije ugljovodonika (Merker i dr., 2006).

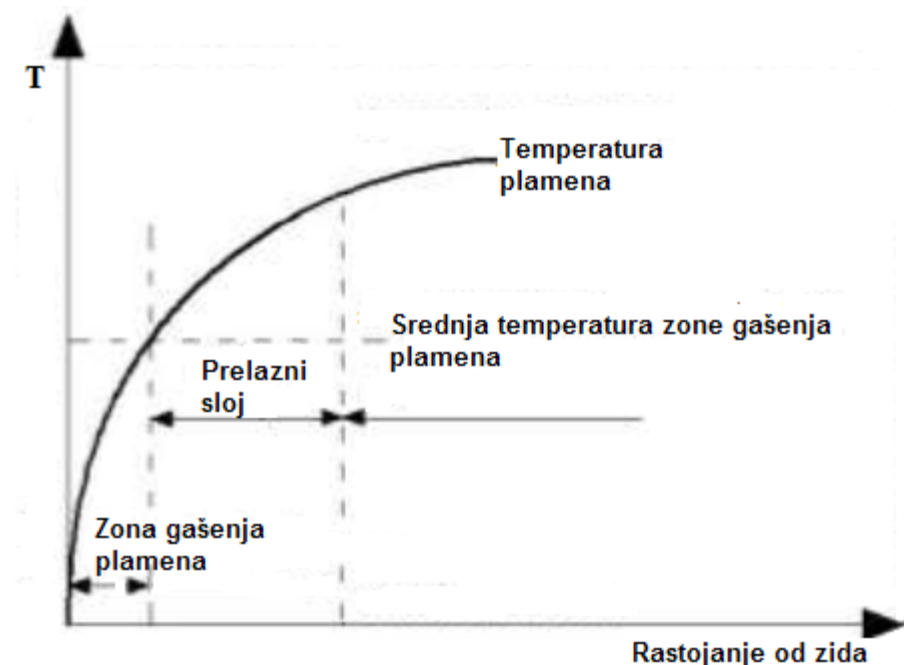
Kao što se zapaža na slici 3.4, najbitniji dovod toplote odvija se tokom oksidacije CO i formiranja CO_2 , što je praćeno značajnim porastom temperature sistema. Brzina hemijskih reakcija tokom sagorevanja zavisi od više fizičkih parametara, pre svega od sastava smeše, temperature i pritiska koji vladaju u cilindru motora. Broj hemijskih reakcija koje se odvijaju tokom procesa sagorevanja kreće se od nekoliko stotina do nekoliko hiljada (Heywood, 1988). Definisanje svih elementarnih reakcija je veoma teško, pogotovo ako se uzme u obzir trodimenzionalna turbulentna slika unutar cilindra motora. Za potrebe proračuna koriste se

uprošćeni reakcioni mehanizmi opisani u literaturi Vestbruka i saradnika (Westbrook i Dryer, 1981). Promena koncentracije ugljovodonika tokom reakcije sagorevanja data je jednačinom:

$$\frac{d[C_xH_y]}{dt} = -A \exp\left(\frac{E_A}{RT}\right) [C_xH_y]^{m_0} [O_2]^n \quad (3.2)$$

Parametri: A, m i n kao i energija aktivacije E_A/R dati su tabelarno za svaki ugljovodonik (Westbrook i Dryer, 1981).

Pored ugljen-dioksida i vode, kao krajnjih produkata sagorevanja, u izduvnim gasovima se detektuje i izvesna količina nesagorelih ugljovodonika. Dominantne faktore, zbog kojih se u produktima sagorevanja mogu javiti nesagoreli ugljovodonici, predstajaju: suviše mala razvijena toplota tokom pretplamenih reakcija da bi dovela do upaljenja smeše ili gubici toplote koji znatno prevazilaze razvijenu toplotu tako da dolazi do prekida pretplamenih reakcija. Prisustvo nesagorelih ugljovodonika u izduvnim gasovima uglavnom se pripisuje raznolikosti temperaturnog profila. Osnovni temperaturni profil tokom sagorevanja u motoru prikazan je na slici 3.5.



Slika 3.5. Temperaturne zone tokom sagorevanja

Tokom sagorevanja u cilindru motora mogu da se postave granice tri odvojene zone: zona gašenja plamena, prelazni sloj i zona plamena. Kriva promene temperatura na slici 3.5 je data u funkciji udaljenosti od zida cilindra. Deo smeše blizu zidova komore za sagorevanje izložen je intenzivnom hlađenju, što dovodi do smanjivanja brzine reakcija sagorevanja. Smanjenje brzine hemijskih reakcija dovodi do gašenja plamena, tako da uz sam zid cilindra zapravo i ne dolazi do sagorevanja. Zona locirana uz sam zid cilindra je karakteristična po mnogo nižim temperaturama i naziva se "tamna" zona, za razliku od "svetle" zone kod koje se odvijaju predplamene reakcije i koja obiluje peroksidima, aldehydima i drugim prelaznim produktima procesa sagorevanja. Gašenje plamena u blizini zidova cilindra predstavlja primarni uzrok nastajanja nesagorelih ugljovodonika i BTEX jedinjenja u izduvnim gasovima motora SUS.

Pojavu gašenja plamena u blizini zidova cilindra potvrđuju brojni eksperimenti. Najveće koncentracije nesagorelih ugljovodonika detektovane su u uzorcima uzetim u blizini zida komore motora, dok se povećanjem udela gasa iz glavnog prostora koncentracija ugljovodonika smanjuje (Flagan i Seinfeld, 1988).

Bitni faktori koji utiču na širinu zone gašenja plamena, samim tim i formiranje nesagorelih ugljovodonika uključuju: sastav, pritisak, temperaturu i turbulenciju smeše.

Sa povećanjem pritiska u cilindru motora rastojanje gašenja plamena u cilindru motora (D) se smanjuje.

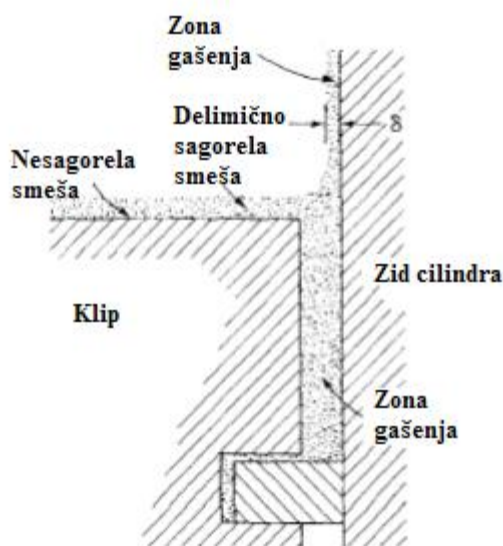
$$D \approx \frac{1}{p^n} \quad (3.3)$$

Vrednost koeficijenta n zavisi od sastava smeše i ima vrednost od 0,8 do 1,0. Smanjenje zone gašenja plamena utiče na formiranje manje količine toksičnih ugljovodonika, zbog čega je veoma važno održavati visok pritisak u cilindru i to pogotovo prilikom samog početka procesa sagorevanja.

Povećanjem temperature sagorevanja povećava se i širina zone u kojoj postoje uslovi za kvalitetno odvijanje lančanih reakcija. Zona gašenja plamena se potiskuje prema zidu cilindra, dok se količina nesagorelih ugljovodonika u izduvnim gasovima smanjuje. Pored toga povećanje temperature tokom sagorevanja ima pozitivan efekat i na efikasnost termodinamičkog ciklusa koji se odvija u cilindru motora (Dorić, 2012).

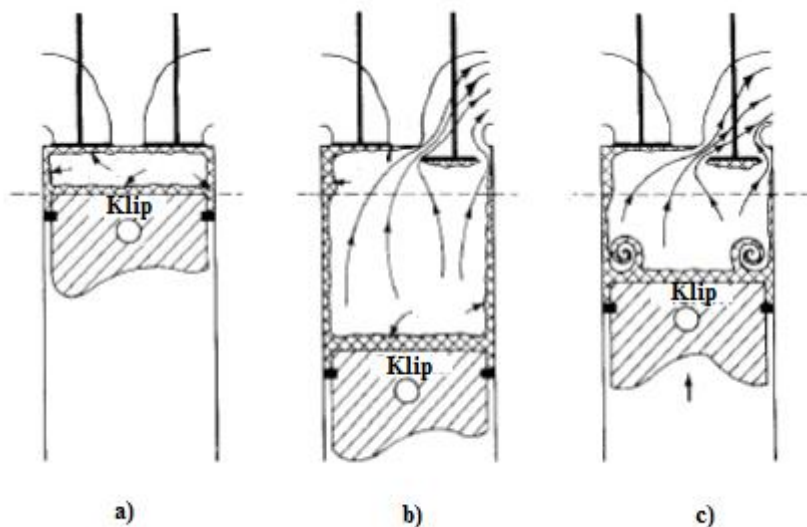
3.3. Izvori emisije BTEX jedinjenja u procesu sagorevanja u motoru

Tokom kompresije i sagorevanja rastući pritisak u cilindru potiskuje gorivo u pukotine između klipova, prstenova i zida cilindra. Najveći deo potisnutog goriva izbegava sam proces sagorevanja, jer male dimenzije pukotina ne obezbeđuju ulazak plamena. Potisnuto gorivo, koje kasnije u procesima ekspanzije i izduvnim procesima napušta pukotine, predstavlja značajan izvor nepotpuno sagorelih ugljovodonika i BTEX jedinjenja.



Slika 3.6. Šematski prikaz zone gašenja plamena u blizini zidova cilindra

Veoma značajan izvor emisije BTEX jedinjenja predstavlja "zona gašenja plamena" smeštena uz zid cilindra motora u kom se odvija proces sagorevanja, slika 3.6. Zona gašenja plamena sadrži nesagorele ili delimično sagorele produkte smeše goriva i vazduha koji zaostaju na zidu.



Slika 3.7. Šematski prikaz emisije ugljovodonika iz cilindra motora

Na slici 3.7 je dat šematski prikaz emisije BTEX jedinjenja nastalih tokom radnog ciklusa motora:

- a) Zona gašenja plamena formira se uz hladne zidove i unutar pukotina cilindra.
- b) Gas iz pukotina ekspanduje u zapreminu cilindra uporedo sa padom pritiska. Nakon otvaranja izduvnog ventila gasovi napuštaju cilindar.
- c) Ugljovodonicima obogaćen sloj koji se nalazi uz zid cilindra formira vrtlog prilikom kretanja klipa nagore tokom izduvnog dela ciklusa.

Izvor emisije BTEX jedinjenja i ostalih ugljovodonika predstavlja i nepotpuno sagorevanje usled zaustavljanja plamena u delu ciklusa u kom je sagorevanje izuzetno sporo. Emisije ugljovodonika se najčešće povezuju sa epizodama snažne akceleracije u uslovima bogate i stehiometrijske smeše, pri čemu je emisija proporcionalna potrošnji goriva.

Ugljovodonične emisije se mogu povezati i sa dugim epizodama deceleracije. Kad je snaga motora negativna, posebno tokom usporavanja i kočionih događaja i dalje postoji značajan dotok vazduha, ali je dotok goriva mali ili ga uopšte nema. Kondenzovano gorivo će biti uklonjeno isparavanjem tokom datog perioda i proćiće kroz cilindre. Tokom perioda deceleracije smeša gorivo/vazduh je karakteristično veoma siromašna tako da dolazi do izuzetno slabog sagorevanja ili ono u potpunosti izostaje i emisije ugljovodonika postaju visoke (Barth i dr., 2000).

3.4. Koeficijent viška vazduha- λ

Smeša goriva i vazduha u kojoj su odmerene količine goriva i vazduha u takvom međusobnom odnosu da bi se nakon sagorevanja celokupne količine goriva utrošila celokupna količina kiseonika iz vazduha predstavlja *stehiometrijsku, teorijsku ili normalnu smešu*. U stehiometrijskim uslovima potrebno je 14,7 kg vazduha za sagorevanje 1 kg benzina.

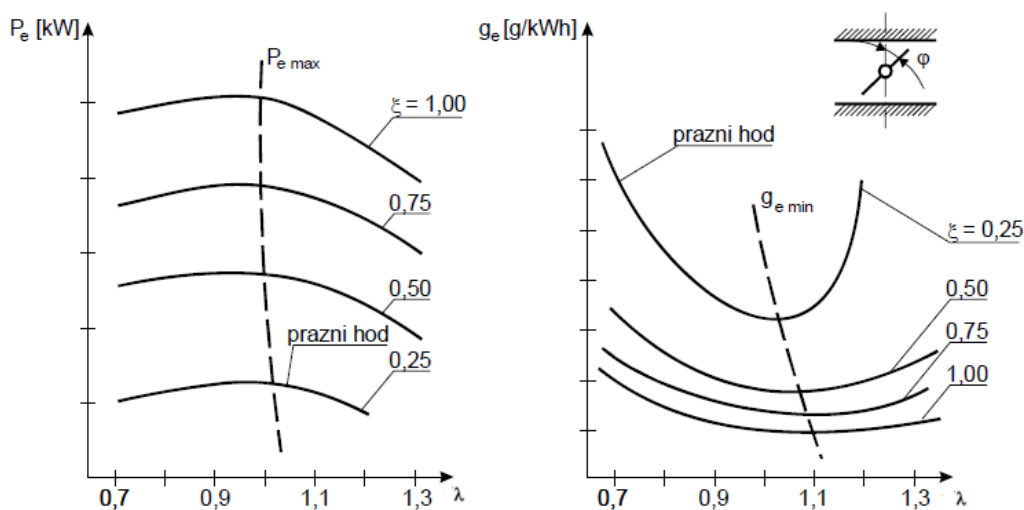
Odstupanje stvarno usisane količine vazduha od minimalno potrebne za potpuno sagorevanje goriva definisano je *koeficijentom viška vazduha λ* (ekvivalentni odnos). Kod stehiometrijske smeše $\lambda=1$. Ukoliko nakon sagorevanja u produktima sagorevanja ostane nesagorelog goriva radi se o *bogatoj smeši* $\lambda < 1$, a ako ostane neutrošenog kiseonika u pitanju je *siromašna smeša* $\lambda > 1$. Granice masenih odnosa nakon kojih više nije moguće paljenje smeše zovu se granice paljenja smeše i kreću se u opsegu $\lambda = 0,6$ i $\lambda = 1,6$ (Filipović, 2006).

Nemogućnost paljenja suviše bogate smeše, do koje se dolazi ili povećanjem količine goriva ili smanjenjem količine vazduha u odnosu na granicu paljenja, javlja se kao posledica suviše male količine vazduha, jer se zapali mala količina goriva koja utroši sav raspoloživi kiseonik, te se plamen zbog nedostatka kiseonika gasi. Nemogućnost paljenja siromašne smeše preko granice paljenja dolazi kao posledica velike udaljenosti kapljica goriva i prevelikih količina vazduha oko svake kapljice. Tako, pri paljenju siromašne smeše, razvijena toplota na elektrodama svećice nije dovoljna da zagreje veliku masu vazduha do temperature potrebne za paljenje ostalih delova smeše koji su udaljeni od svećice i zato smeša ne može da se upali. Pojam bogata ili siromašna smeša zasniva se na količini goriva, a ne količini vazduha, u odnosu na teorijsku količinu. To znači da u bogatoj smeši postoji višak goriva u odnosu na količinu goriva u teorijskoj smeši.

Kod motora sa karburatorom gorivo se dozira tako da je sastav smeše koja ulazi u cilindar u granicama $0,8 < \lambda < 1,15$. Rad motora u području $\lambda=1,0 - 1,15$ obezbeđuje potpuno, ekonomično i stabilno sagorevanje, dok rad motora na režimima pune snage zahteva vrednosti $\lambda=0,8 - 1,0$.

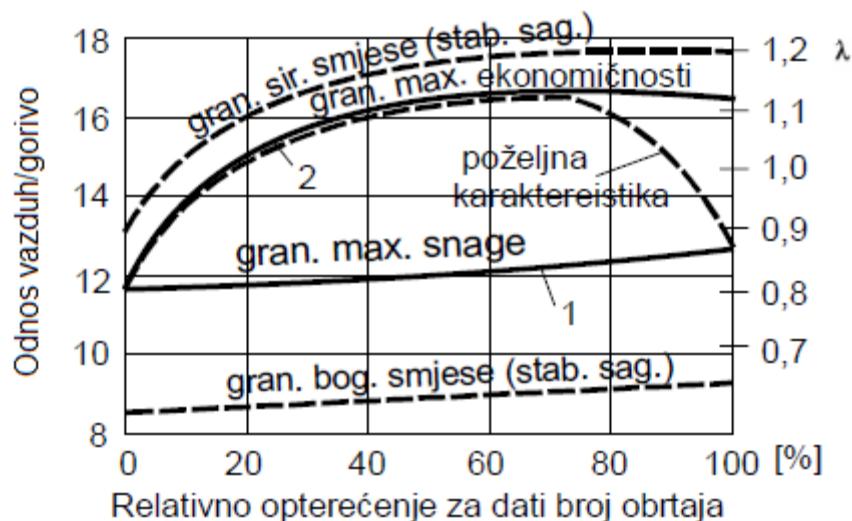
Na slici 3.8 prikazana je zavisnost efektivne snage i efektivne specifične potrošnje u funkciji koeficijenta viška vazduha (tzv. regulatorske karakteristike). Iz toka krivih na slici 3.8 se vidi da sa povećanjem λ snaga u početku raste, dostiže svoj maksimum, a zatim se smanjuje. Specifična potrošnja goriva se sa porastom λ smanjuje, dostiže svoj minimum a zatim raste. Svaka tačka regulatorske karakteristike (slika 3.8) snima se pri ustaljenom toplotnom režimu motora,

optimalnom uglu prepaljenja, konstantnom broju obrtaja i nepromenjenom položaju leptira (ξ). Sastav smeše pri kom se postiže maksimalna snaga ne poklapa se sa sastavom smeše pri kom se postiže minimalna potrošnja. Ako se tačke različitih krivih koje odgovaraju maksimalnoj snazi spoje dobija se kriva $P_{e \max}$. Spajanjem tačaka koje odgovaraju minimalnim potrošnjama goriva dobija se kriva $g_{e \min}$. Na taj način kriva $P_{e \max}$ odgovara sastavu smeše koji obezbeđuje maksimalnu snagu, a kriva $g_{e \min}$ maksimalnu ekonomičnost. Ukoliko bi se karburator izregulisao tako da se omogući rad pri kom bi se dobila maksimalna ekonomičnost, pri takvoj regulaciji se ne bi mogla ostvariti maksimalna snaga. Ako bi se karburator izregulisao prema maksimalnoj snazi motora, tada gorivo ne bi potpuno sagorevalo ($\lambda < 1$) i rad motora bi bio neekonomičan.



Slika 3.8. Uticaj koeficijenta viška vazduha (λ) na efektivnu snagu i specifičnu potrošnju goriva (Filipović 2006).

Ako se kriva $P_{e \max}$ i $g_{e \min}$, prikazane na slici 3.8, predstave u funkciji koeficijenta viška vazduha (λ), odnosa vazduh/gorivo i snage motora P_e , dobijaju se karakteristike opterećenja karburatora prikazane na slici 3.9. Kriva 1 odgovara regulaciji karburatora na maksimalnu snagu motora, a kriva 2 odgovara regulaciji na maksimalnu ekonomičnost.



Slika 3.9. Karakteristike opterećenja karburatora (Filipović, 2006)

Pošto automobilski motor znatan deo vremena radi sa delimično otvorenim leptirom, najbolje je regulisati karburator na karakteristiku koja odgovara maksimalnoj ekonomičnosti, a pri prelazu motora na rad sa potpuno otvorenim leptirom smeša se mora obogatiti radi postizanja maksimalne snage. Na osnovu toga poželjna karakteristika karburatora mora imati oblik krive prikazane isprekidanom linijom na slici 3.9. Potrebno je napomenuti da su pri različitim brojevima obrtaja motora krive 1 i 2 nešto drugačije ali se tok krivih ne menja.

Na praznom hodu i na malim opterećenjima tj. pri znatnije zatvorenom leptiru, u cilju dobijanja stabilnog rada smeša mora biti obogaćena, jer je u tim uslovima raspršivanje i isparavanje goriva u karburatoru nedovoljno zbog malih brzina kretanja vazduha u difuzoru. Osim toga, sa pritvaranjem leptira povećava se količina zaostalih produkata sagorevanja u cilindru motora te se smanjuje brzina sagorevanja. U određenom stepenu ovo se može prevazići obogaćenjem smeše.

Kod motornih vozila, naročito prilikom eksploatacije u gradu, često dolazi do naglog otvaranja leptira (pri ubrzavanju vozila, pri preticanju itd.). Pri naglom otvaranju leptira nastupa kratkotrajno osiromašenje smeše. Pritisak iza leptira brzo raste, uslovi isparenja goriva se pogoršavaju i kao rezultat toga najkrupnije čestice goriva ostaju na zidovima usisne cevi obrazujući film goriva. Smeša se osiromašuje. Osiromašenje smeše teče dotle dok film goriva ne dostigne debljinu koja odgovara ustaljenom režimu rada motora na datim uslovima. Da bi se

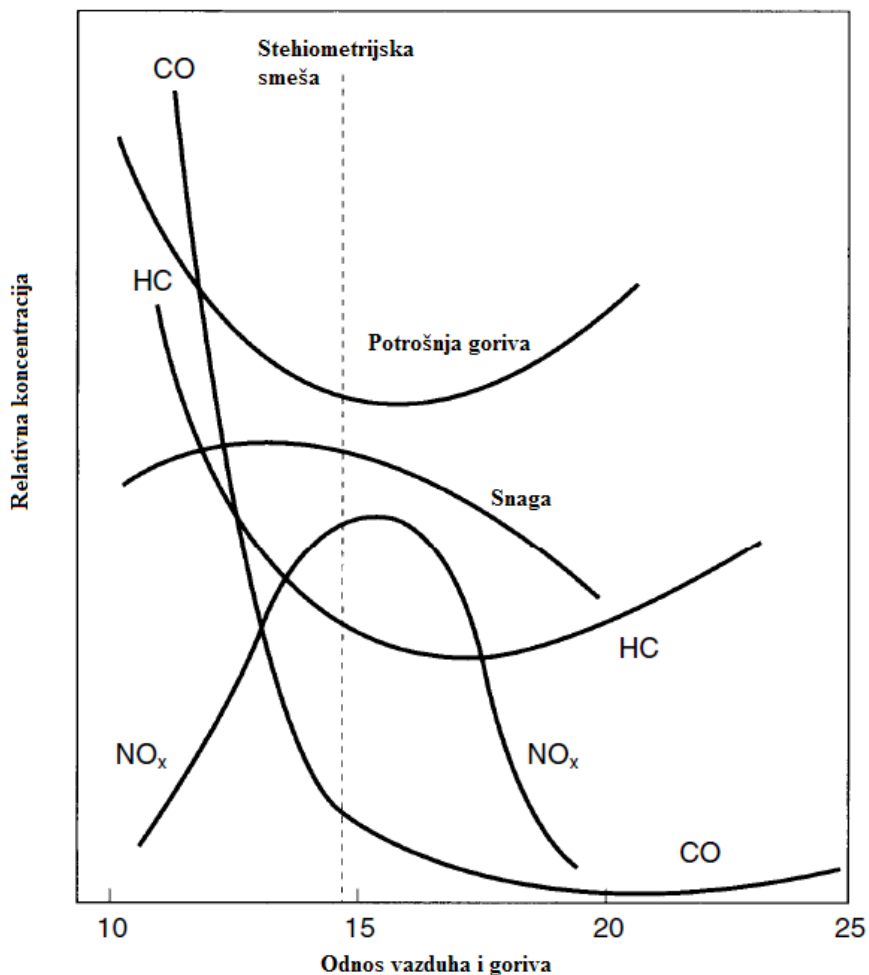
izbeglo pomenuto osiromašenje smeše potrebno je da se smeša prilikom naglog otvaranja leptira obogati, kako bi se poboljšalo prihvatanje motora.

Pri startovanju hladnog motora gorivo koje ulazi u hladan cilindar, kroz hladne usisne cevi, isparava samo delimično i to najlakše frakcije goriva. Pre "skakanja" varnice u cilindru postoji gorivo koje je isparavalo u neznatnoj količini. Tokom startovanja motora, ako se smeša znatno ne obogati, može se desiti da se ona ne upali ili da se upali samo delimično što znači da start motora neće uspeti. Prilikom startovanja motora je potrebno je obezbediti veoma bogatu smešu.

3.5. Značaj odnosa vazduha i goriva

Emisija štetnih gasova se sastoji u najvećem delu od sledećih polutanata: nesagorelih ugljovodonika, oksida azota, ugljen-monoksida, suspendovanih čestica, ugljen-dioksida, vodene pare, oksida sumpora i drugih dodataka gorivima u cilju poboljšanja fizičko- hemijskih karakteristika (aditivi).

Odnos količine vazduha i goriva igra važnu ulogu u efikasnosti procesa sagorevanja, a time i na emisiju gasova, potrošnju goriva kao i na performanse motora. Na slici 3.10 prikazan je uticaj odnosa vazduha i goriva na koncentracione nivoe polutanata u izduvnim gasovima motornih vozila. U slučaju bogatije smeše (višak goriva u odnosu na vazduh), doći će do povećane potrošnje goriva, nepotpunog sagorevanja i veće emisije štetnih gasova, pre svega ugljen monoksida (CO) i nesagorelih ugljovodonika (HC). U slučaju siromašne smeše, višak vazduha u odnosu na gorivo će uticati na manju snagu motora i pogoršanu vozivost vozila. Kada motor radi sa približno stehiometrijskom smešom, idealnom sa aspekta odnosa goriva i vazduha potrebnu za potpuno sagorevanje, količine HC i CO su relativno niske što ne znači da je takva smeša idealna za minimalnu toksičnost ili maksimalnu snagu. U datim uslovima produkcija azotnih oksida je veoma visoka. Navedeni odnosi ukazuju na kompleksnost problema optimizacije emisionih i voznih karakteristika motornih vozila (Colls, 2002; Barth i dr., 2000).



Slika 3.10. Uticaj odnosa vazduha i goriva na relativne koncentracije nivoa polutanata u izduvnim gasovima motornih vozila.

3.6. Uređaji za smanjenje emisije toksičnih gasova

Pri sagorevanju u cilindru Oto motora postavljaju se dva glavna cilja: štetna emisija unutar dopuštenih granica i što niža specifična potrošnja goriva. U usisnu i izduvnu instalaciju se ugrađuju dodatni uređaji za smanjenje koncentracija toksičnih komponenti: ugljen-monoksida (CO), oksida azota (NO_x) i nesagorelih ugljovodonika (C_xH_y). Pri ugrađivanju dodatnih uređaja, kao i kod uvođenja posebnih mera kojima bi se uticalo na proces sagorevanja, u cilju smanjenja emisije toksičnih gasova, treba strogo voditi računa da se time ne utiče značajno na ostale karakteristike motora. Nastojanja da se direktnim uticajem i “regulacijom” procesa

sagorevanja smanji formiranje toksičnih supstanci, dala su do danas samo delimično zadovoljavajuće rezultate.

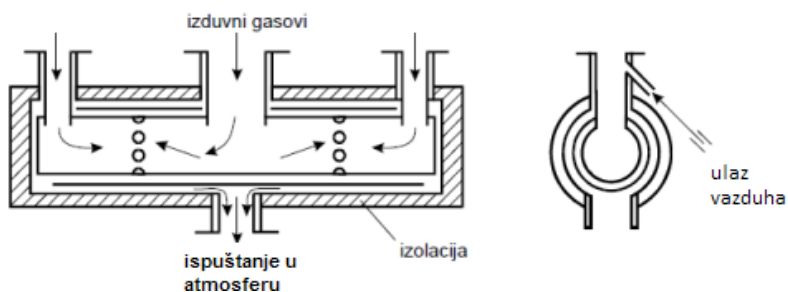
Da bi se smanjila emisija NO_x kod Oto motora, može da se primeni spoljna recirkulacija produkata sagorevanja i dodavanje vode u ulaznu struju vazduha. Recirkulacijom, tj. vraćanjem jednog dela izduvnih gasova ponovo u cilindar motora, postiže se veoma različit uticaj na proces sagorevanja, u zavisnosti od odvijanja procesa sa viškom ili manjkom vazduha, u vidu prethodno izmešanog ili difuzionog plamena. Jedan od efekata recirkulacije je smanjenje temperature plamena, čime dolazi do smanjenja emisije NO_x uz samo neznatno smanjenje snage, ako recirkulacija ne prelazi 40%.

Druga grupa uređaja na izduvnoj instalaciji je predviđena za dekontaminaciju izduvnih gasova naknadnim tretmanom. Prema načinu na koji se gasovi tretiraju, ovi uređaji se mogu podeliti u dve grupe:

- Uređaji za dodatno sagorevanje CO i nesagorelih C_xH_y.
- Uređaji za dekontaminaciju, naknadnom hemijskom reakcijom uz prisustvo katalizatora.

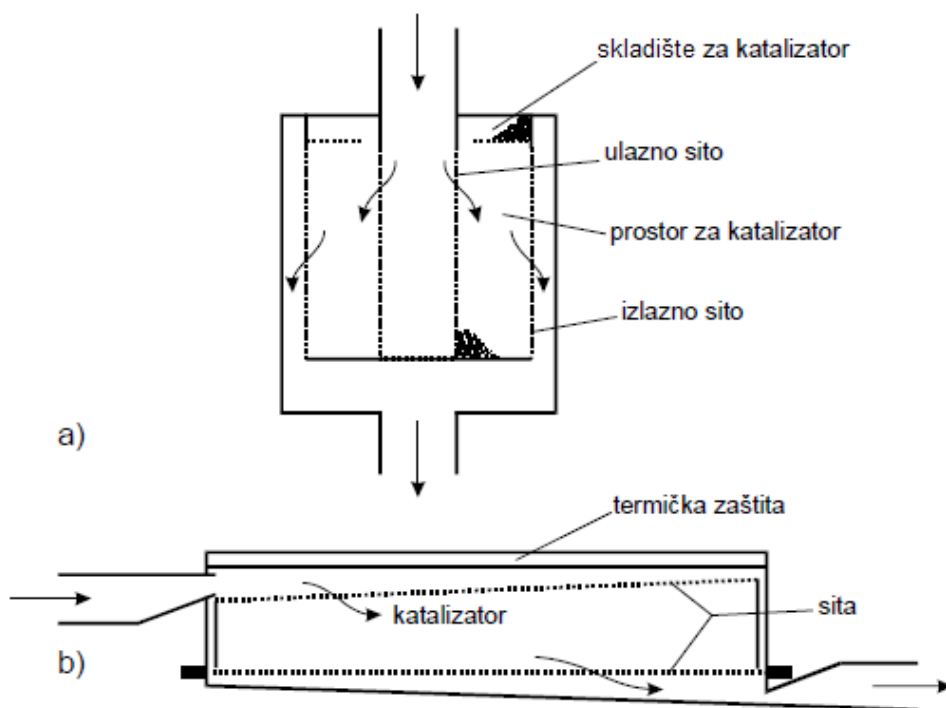
Naknadnim sagorevanjem CO i C_xH_y nastaju CO₂ i H₂O. Tokom sagorevanja treba obezbediti dovoljnu količinu oksidanata i odvijanje reakcije u relativno kratkom vremenu, prilikom strujanja gasova kroz reaktor. Da bi došlo do upaljenja i odvijanja reakcija oksidacije temperatura gasova u reaktoru mora biti veća od 500 °C.

Da bi se dobio uvid u konstruktivnu koncepciju reaktora za naknadno sagorevanje CO i C_xH_y u izduvnim gasovima na slici 3.11 je prikazan termo-reaktor. Dodatni vazduh za sagorevanje obezbeđuje se pomoću pumpe.



Slika 3.11. Šematski prikaz termo reaktora za naknadno sagorevanje izduvnih gasova iz Oto motora

Lokacija katalizatora i koncepcija konstrukcije, koja treba da obezbedi potpunost heterogene hemijske reakcije (odgovarajuću temperaturu, vreme zadržavanja gasova u reaktoru, dodir gasova sa površinom katalizatora i dr.) praktično se realizuje na razne načine. Na slici 3.12 su prikazani primeri dva konstrukciona rešenja reaktora sa katalizatorom.



a) Sa radijalnim protokom gasova, b) Sa aksijalnim protokom gasova

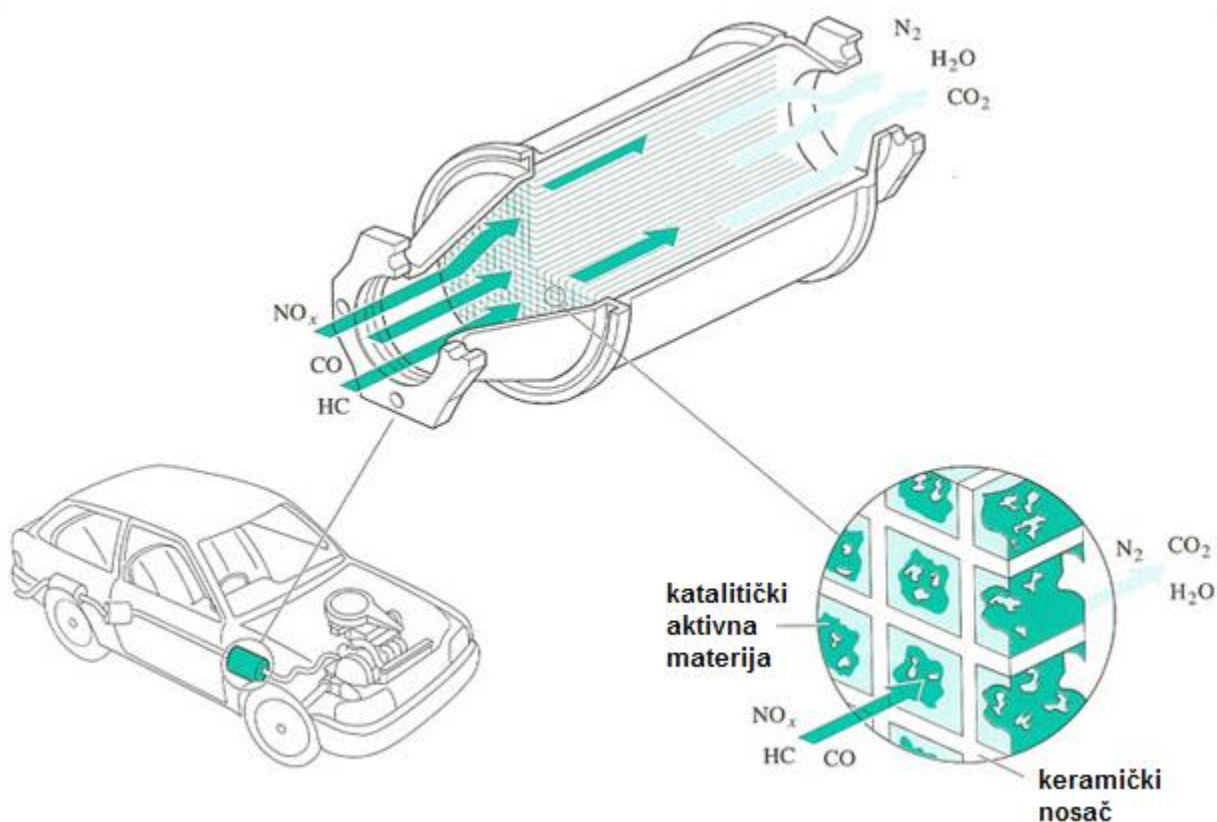
Slika 3.12. Konstrukciono rešenje reaktora za dekontaminaciju izduvnih gasova uz pomoć katalizatora.

Na slici 3.12 a) katalizator je smešten u, tzv. ekspanzioni sud. Gasovi struje kroz rupice u dovodnoj cevi i u zidovima ekspanzionog suda. Radijalnim prolazom kroz sloj katalizatora obezbeđuje se potrebno vreme za hemijsku reakciju. U rešenju pod b) vreme kontakta se obezbeđuje aksijalnom debljinom sloja katalizatora. Poslednji uređaj je naročito podesan za smeštanje na izduvnu cev, koja prolazi ispod poda automobila.

3.7. Katalizator

Oto motori novije generacije opremljeni su katalizatorom (katalitičkim konvertorom), čija je glavna uloga zaštita životne sredine. Katalizator je smešten u prvom izduvnom loncu, što je moguće bliže motoru, kako bi se što pre zagrejao (slika 3.13). Tek tada katalizator postaje potpuno efikasan. U katalizatoru se štetni gasovi iz izduva motora pretvaraju u ekološki prihvatljive. Katalitički konvertori, trostruki katalizatori, se koriste u automobilima u cilju smanjenja koncentracije ugljen-monoksida, oksida azota i ispraljivih ugljovodonika (HC) u izduvnim gasovima. Bez katalitičkog tretiranja na svaki pređeni kilometar u atmosferu bi se emitovalo 10 g CO, 2 g NO_x i 1 g ugljovodonika (Đorđević i Jovanić, 2007).

Tostepeni katalizator je sačinjen od keramičkog nosača (70%) koji je po sastavu kordijerit ($2\text{MgO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) magnezijum-alumosilikat iz grupe ciklosilikata (Kington i Davis, 1991) sa niskim koeficijentom toplotnog širenja ($20 \cdot 10^{-7}/^\circ\text{C}$) (Đorđević i Jovanić, 2007), poznat po dobrim mehaničkim osobinama, zbog čega se koristi u proizvodima koji se podvrgavaju visokim temperaturama. Na nosač se u obliku tankog sloja nanosi premaz koji se sastoji od smeše barijum-, cirkonijum-, cer- i aluminijum-oksida. Tanak sloj oksida, koji čini oko 30% mase trostepenog katalizatora, obezbeđuje veliku aktivnu površinu i služi kao akumulator kiseonika. Na premazu, velike površine, fino se disperguje aktivni katalizator koji se sastoji od platine, paladijuma (0,2-0,6 % u odnosu na masu katalizatora) i vrlo male količine rodijuma (0,04-0,06 % u odnosu na masu katalizatora). Katalizator je smešten u kućište od kvalitetnog čelika. Šematski prikaz trostepenog katalizatora dat je na slici 3.13.

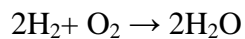
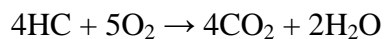
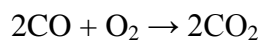


Slika 3.13. Trostepeni katalizator

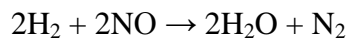
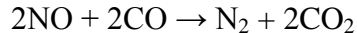
Štetni gasovi, kao što su ugljen-monoksid (CO), nesagoreli ugljovodici (HC) i oksidi azota (NO_x) prolaze kroz katalizator u kom dolazi do hemijskih reakcija oksidacije, pri čemu se toksični ugljen-monoksid (CO) pretvara u ugljen-dioksid (CO_2), nesagoreli ugljovodnici (HC) u ugljen-dioksid i vodenu paru (H_2O), a oksidi azota (NO_x) u azot (N_2).

U katalitičkom konvertoru, koji postaje aktivan na temperaturama iznad 200°C odigravaju se sledeće reakcije (Gong i dr., 2011):

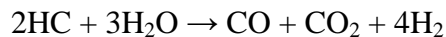
Reakcije oksidacije:



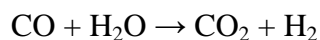
Redukcione reakcije:



Reakcija reforminga u parnoj fazi:



Reakcija vodenog gasa:



Najveću efikasnost katalizator ostvaruje prilikom napajanja smešom vazduha i benzina u stehiometrijskom odnosu. Za pravilno i potpuno sagorevanje 1g goriva, potrebno je 14,7 g vazduha.

Najvažniji deo katalizatora predstavlja jezgro, sačasta konstrukcija izrađena od keramičkog materijala presvučenog vrlo tankim slojem katalitički aktivne materije (smeša platine, paladijuma i rodijuma) koja ubrzava hemijsku razgradnju štetnih sastojaka izduvnih gasova prilikom prolaska kroz katalizator, ne učestvujući pritom u hemijskoj reakciji. Platina i paladijum katalizuju oksidaciju ugljovodonika i ugljen-monoksida kiseonikom, dok je rodijumski katalizator odgovoran za redukciju azotovih oksida. Proces započinje redukcijom azotovih oksida. Redukcija je neuspešna pri visokoj koncentraciji kiseonika tipičnoj za pojedine faze rada motora. Pri visokoj koncentraciji kiseonika, CO i ugljovodonici podležu oksidaciji, te je njihova količina nedovoljna za redukciju azotovih oksida. S druge strane i suviše niska koncentracija kiseonika u gasu je nepovoljna, jer u takvim uslovima ne dolazi do potpune konverzije ugljenmoksida i ugljovodonika. U tom smislu veoma značajnu ulogu ima oksidni premaz koji reverzibilno vezuje višak kiseonika i po potrebi ga otpušta u onim fazama rada motora kada je koncentracija kiseonika u gasu niska. Primenom katalitičkih reaktora koncentracija ugljovodonika i ugljen-monoksida u izduvnom gasu se smanjuje za 95%, a azotovih oksida za 90%.

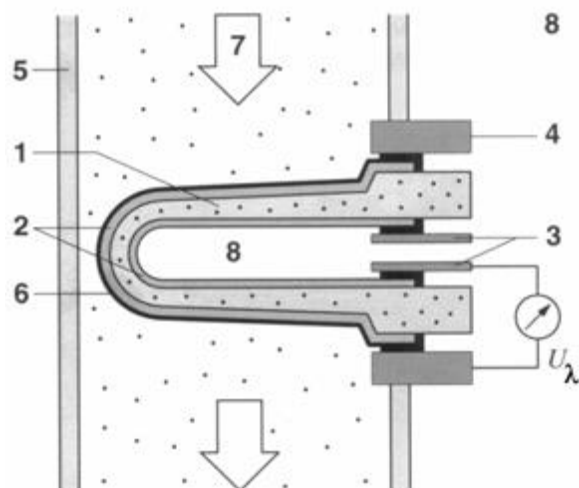
Izduvni gasovi prilikom prolaska kroz saće imaju temperaturu od 300 do 350°C te na taj način zagrevaju sam katalizator u kojem započinje hemijska reakcija oksidacije toksičnih gasova (HC, CO, NO_x) u ekološki prihvatljiva jedinjenja (CO₂, H₂O, N₂) (Gong i dr. 2011). Kako bi pravilno funkcionisao katalizator mora biti zagrejan do radne temperature koja se kreće od 400°C do 800°C. U cilju što bržeg zagrevanja katalizatori se postavljaju što bliže motoru, slika 3.13. Najvažniji zahtev za što ispravniji rad i efikasnost katalizatora je rad motora sa stehiometrijskim smešom ($\lambda=1$). U tu svrhu se između motora i katalizatora postavlja lambda sonda.

Veoma je bitno naglasiti da se i najkraćom upotrebom benzina sa sadržajem olova nepovratno uništava katalitički konvertor. Učinak katalizatora se smanjuje toliko da njegovo postojanje postaje praktično beskorisno. Efikasnost katalizatora je zadovoljavajuća do 100.000 km ili 5 godina, nakon toga potrebno je ispitati katalitički potencijal. Osim olova, do brzog uništavanja katalizatora dovodi i prisutnost nesagorelog benzina u katalizatoru.

3.8. Lambda sonda

Lambda sonda predstavlja neizostavni element izduvnog sistema modernih motornih vozila pokretanih Oto motorom. Predstavlja senzor količine kiseonika u izduvnim gasovima i kao regulacioni element učestvuje u pripremi gorive smeše. Stehiometrijski odnos goriva i vazduha u smeši je neophodan kako bi katalizatori radili sa maksimalnom iskoristivošću. Odnos goriva i vazduha mora biti idealan u smislu da nakon sagorevanja u cilindru ne ostane nesagorelog goriva ili, obrnuto, da ne bude viška kiseonika odnosno vazduha (Sardarmehni i dr., 2013).

Funkcija lambda sonde je detektovanje odstupanja lambda faktora u izduvnim gasovima od idealne vrednosti. Na taj način omogućava računaru da reguliše količinu ubrizganog goriva u usisne cevi. U slučaju gorivom zasićene smeše, smanjuje se količina ubrizganog goriva i obratno.



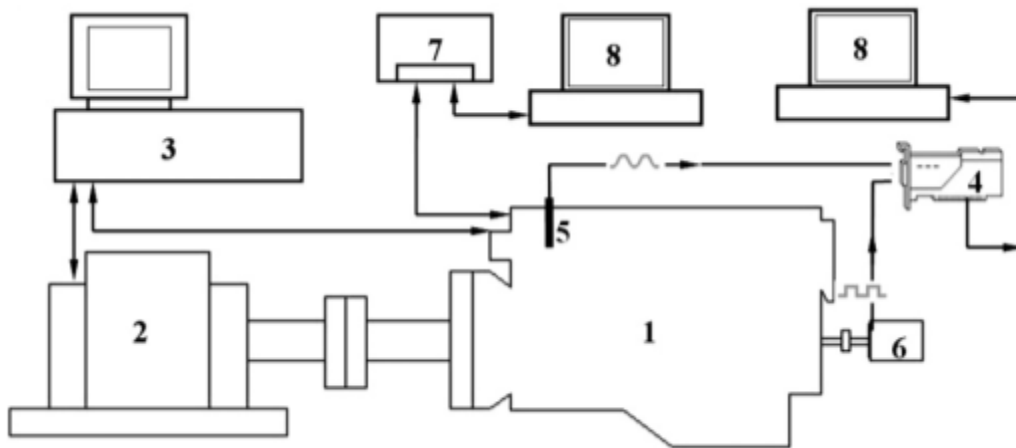
Slika 3.14. Lambda sonda

Lambda sonda, prikazana na slici 3.14, ugrađena je u izduvnu cev (5). Spoljna strana sonde izložena je izduvnim gasovima (7), a unutrašnja okolnom vazduhu (8) koji ulazi u šupljinu sonde. Porozno telo od posebne keramike (1) (cirkonijumov oksid) omogućava difuziju molekula kiseonika. Na spoljnim stranama tela sonde nalaze se elektrode (2). Strana koja je izložena vrelim izduvnim gasovima zaštićena je poroznim keramičkim slojem (6). Ukoliko je sadržaj kiseonika u izduvnoj cevi i u okolnom vazduhu različit, između elektroda (2) spojenih na kontakte (3) i (4) dolazi do stvaranja električnog napona (U_λ), uslovljenog postojanjem koncentracionog gradijenta. Na primer, kod $\lambda=0.95$, u izduvnim gasovima ima oko 0.2 do 0.3 % vol. kiseonika. Lambda sonda ima u uskom području (λ -prozor) skokovitu naponsku karakteristiku koja se koristi kao regulaciona veličina (kod $\lambda < 1$ napon iznosi 800... 1000 mV, kod $\lambda > 1$ napon opadne na približno 100 mV). Na taj način sonda signalizira regulacionom uređaju da li u izduvnim gasovima ima previše ili premalo kiseonika, te se u skladu sa tim menja količina ubrizgavanog goriva.

4. EKSPERIMENTALNI DEO

Eksperimentalni deo doktorske disertacije sproveden je u Laboratoriji za Motore i motorna vozila, Departmana za Mehanizaciju i konstrukciono mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. U cilju definsanja optimalnih parametara za definisanje emisionog modela, korišćena je eksperimentalna oprema Laboratorije za Motore i motorna vozila u kombinaciji sa opremom Laboratorije za monitoring deponija, otpadnih voda i vazduha Departmana za Inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštitu na radu Fakulteta tehničkih nauka. Mereni su koncentracioni nivoi BTEX jedinjenja u izduvnim gasovima motora SUS pri različitom broju obrtaja, promenljivom opterećenju, pri čemu je variran odnos količine vazduha i goriva u napojnoj smeši.

Tokom eksperimentalnih istraživanja ispitivane su emisije karakteristike Oto motora sa prirodnim usisavanjem sa specifikacijama koje su date tabelom 1. Na slici 4.1 je dat šematski prikaz opreme korišćene pri definisanju modela emisije BTEX jedinjenja.



Slika 4.1. Šematski prikaz eksperimentalne aparature: 1. Motor, 2. Dinamometar, 3. Kontroler dinamometra, 4. AVL pojačivač, 5. Pretvarač (transduktor) pritiska, 6. Optički enkoder, 7. Elektronska upravljačka jedinica-ECU, 8. Kompjuter (Adamović i dr., 2013)

4.1. Oto motor EFI 1.1

Tokom eksperimentalnih istraživanja ispitivane su emisione karakteristike Oto motora sa elektronskim ubrizgavanjem goriva 1,1 EFI (Electronic Fuel Injection). Specifikacije ispitivanog motora su prikazane u tabeli 4.1. Motor 1,1 EFI je na šemi sistema za indiciranje motora (sl. 4.1) označen pozicijom 1.

Tabela 4.1. Specifikacija ispitivanog motora

Naziv motora	1,1 EFI
Proizvođač	Zastava Kragujevac
Tip	Atmosferski Oto motor
Broj cilindara	4
Broj ventila (po cilindru)	2
Radna zapremina	1116 cm ³
Maksimalna snaga motora	45 kW pri 5600 min ⁻¹
Maksimalni obrtni moment	85 Nm pri 3800 min ⁻¹
Hlađenje	Vodom
Napajanje gorivom	BOSCH M4.6
Stepen kompresije	9,2
Prečnik klipa	80 mm
Hod klipa	55,5 mm

4.2. Dinamometar SCHENCK W 230 sa propratnom opremom

Proces kočenja ispitivanog Oto motora EFI 1.1, u cilju postizanja odgovarajućih radnih režima, izveden je na dinamometru SCHENCK W 230 (sl. 4.1, pozicije 2 i 3). Uređaj spada u grupu dinamometara sa vihornim strujama i funkcioniše na principu merenja polaznog momenta ukočenog asinhronog motora pomoću merenja sile opruge. Sadrži takozvani „višepolni magnetni sistem”, dobijen naizmeničnim rasporedom standardnih dvopolnih magneta, koji se obrće brzinom merene osovine (Petrović, 1988). Formirano obrtno polje izaziva vihorne struje u induktu od aluminijuma zvonastog oblika i momenat srazmeran brzini obrtanja. Momenat se

uravnotežuje torzionim momentom opruge srazmernom uglu skretanja kazaljke instrumenta (Jain, 1997).

Tabela 4.2. Osnovne karakteristike dinamometra SCHENCK W 230

Naziv	SCHENCK W 230
Snaga	230 kW
Obrtni moment	750 Nm
Minimalna brzina	620 min ⁻¹
Maksimalna brzina	7500 min ⁻¹
Minimalna brzina za maksimalnu snagu	2928 min ⁻¹
Moment inercije	0,53 kgm ²
Maksimalna jačina struje	6,1 A
Radna temperatura	od 0°C do +70°C bez aditiva, od -25°C do +70°C sa antifrizom i redukovanom snagom od 10 do 20%

4.3. Piezoelektrični senzor pritiska u cilindru

Pritisak u komori za sagorevanje praćen je pomoću piezoelektričnog senzora RFT sa osnovnim karakteristikama datim u tabeli 4.3. Na slici 4.1 senzor je označen pozicijom 4.

Tabela 4.3. Karakteristike senzora pritiska

Naziv	PDZ 60/14-2
Merni opseg	do 200 bar
Radna temperatura	do 400°C
Hlađenje	Vodom
Osetljivost	35 pC/bar
Navoj	M5 x 0,5

4.4. AVL pojačivač

Za pojačanje signala sa piezoelektričnog senzora korišćen je AVL 3059 pojačivač čije su osnovne tehničke karakteristike prikazane tabelom 4. Na slici 4.1 pojačivač je označen pozicijom 5.

Tabela 4.4. Karakteristike pojačivača AVL 3059

Naziv	AVL 3059
Konektor	BNC
Tranzistor	MOSFET
Napon	$\leq \pm 40\text{V}$ (statični uslovi) $\leq \pm 125\text{ V}$ (promenljivi uslovi)
Maksimalna promena izlaznog napona	$\geq 0,5\text{ V/ms}$
Ulaz	50/60 Hz, 240/220/110 V $\pm 10\%$ pri maksimalno 500 mA
Izlaz	$\pm 15\text{V}$, tolerancija $\pm 5\%$ (0-60°C)
Maksimalno opterećenje	500 mA po kanalu, za oba kanala do 800 mA
Temperaturni koeficijent	manji od 0,02% po °C
Temperatura radnog okruženja	0°C do +60 °C
Dimenzije po jednom pojačivaču	123 mm x 82 mm
Masa	0,5 kg

4.5. Senzor položaja kolenastog vratila

Precizan položaj kolenastog vratila je determinisan preko optičkog enkodera HEDSS serije ISC 3806. Tehničke karakteristike su prikazane tabelom 4.5, dok je na šemi datoj na slici 4.1 označen pozicijom 6.

Tabela 4.5. Osnovne karakteristike enkodera položaja kolenastog vratila

Naziv	HEDSS ISC 3806
Potrošnja	≤ 120 mA
Frekvencija	0-100 KHz
Izlazna faza	$90^{\circ} \pm 45^{\circ}$
Napajanje	5-24 V
Broj impulsa	2000 po obrtaju
Maksimalni broj obrtaja	6000 min^{-1}
Obrtni moment	$\leq 1,5 \times 10^{-3} \text{ Nm}$ (25°C)
Masa	130 g

4.6. Elektronska upravljačka jedinica- ECU

Elektronska upravljačka jedinica ECU (Engine Control Unit) je mikroprocesorski sistem čiji je primarni zadatak da na osnovu brojnih senzora instaliranih u motoru izračuna i omogući isporuku potrebne količine goriva u cilju obezbeđenja maksimalnih performansi motora (Sardarmehni i dr., 2013). ECU jedinica neprestalno prati parametre motora kao što su: temperatura, broj obrtaja, položaj papuče gasa, količinu usisanog vazduha i sastav izduvnih gasova u cilju finog podešavanja rada motora. Ukoliko se neki od senzora ne funkcioniše usled kvara, ECU jedinica prelazi na poseban sigurnosni režim rada. U okviru sigurnosnog režima motor i dalje nastavlja sa radom sa nešto smanjenim performansama.

U cilju variranja odnosa vazduha i goriva tokom eksperimentalnih istraživanja u okviru dotorske disertacije korišćena je širokopojasna lambda sonda BOSCH upravljana sa VEMS V3.6 računarom. Lambda sonda u okviru regulacionog sistema obezbeđuje odgovarajući sastav smeše goriva i vazduha.

Eksperimentalna oprema je kontrolisana preko PC računara. Na sl. 4.1 kontroler VEMS V 3,6 označen je pozicijom 7, a računar pozicijom 8. Kontrolisanje radnih parametara motora se sprovodi ne samo zbog variranja stehiometrijskog odnosa vazduha i goriva, već i zbog mogućnosti jednostavnog i brzog variranja različitih parametara kao što su mape paljenja i

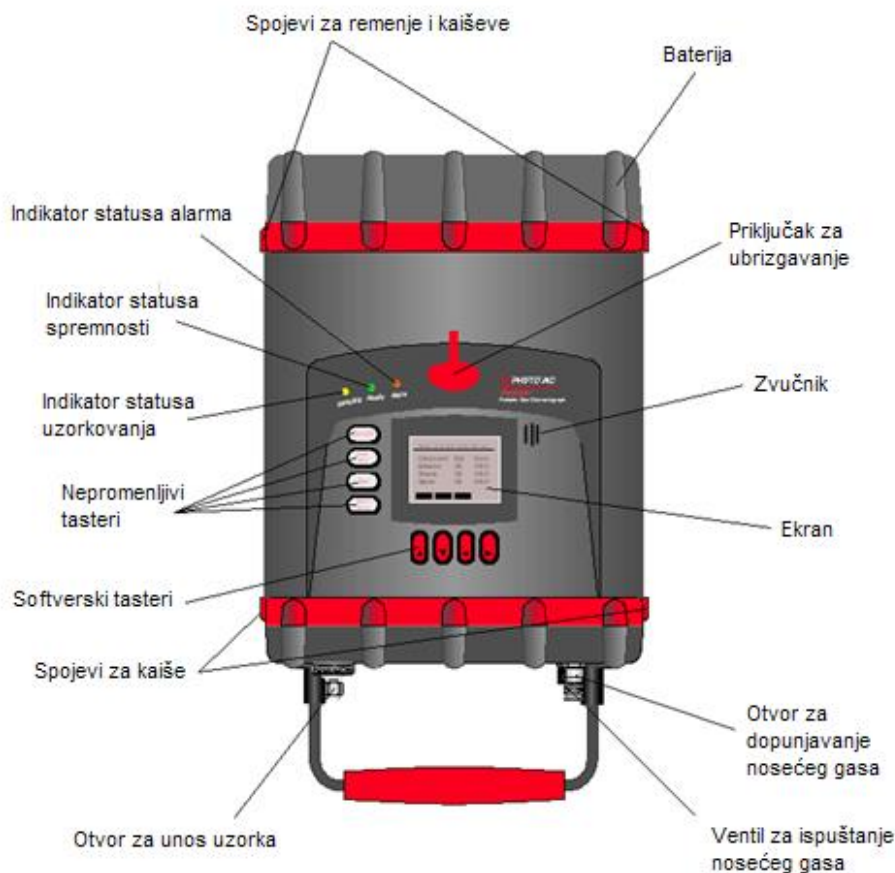
ubrizgavanja u cilju maksimalnog sinhronizovanja ulaznih parametara simulacije sa parametrima rada ispitivanog eksperimentalnog motora.

Pored optičkog enkodera, za određivanje položaja kolenastog vratila, korišćen je i HALL senzor koji se može naći kod svih Oto motora koji poseduju savremene sisteme paljenja i ubrizgavanja. Uloga HALL senzora je da omogući adekvatan rad motora i izračuna tačan broj obrtaja, praćenjem promena u magnetnom polju nastalih prilikom obrtanja vratila, koji se očitava preko računara. Za određivanje veličine prigušenja, odnosno definisanja odgovarajućeg parcijalnog opterećenja, korišćen je signal sa potenciometra koji definiše otklon zakretanja leptira i šalje signal u VEMS. Putem VEMS-a je praćen i podpritisak u usisnom kolektoru preko senzora pritiska. Pored merenja depresije senzor pritiska može da se koristi i kod merenja nadpritiska (do 250 kPa) prehranjivanih motora.

4.7. Merenje koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja

Detekcija i kvantifikacija koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja u izduvnim gasovima motora SUS sprovedena je korišćenjem sofisticiranog uređaja, mobilnog gasnog hromatografa Voyager-Photovac, slika 4.2. Uređaj na licu mesta (*in-situ* i *on-line*) u veoma kratkom vremenskom intervalu kvalitativno i kvantitativno, veoma precizno (sa granicom detekcije od 1 ppb), određuje sastav komponenti uzoraka gasa. Pored BTEX jedinjenja, uređaj se koristi za detekciju i kvantifikaciju 40 aeropolutanata koji spadaju u grupu lako isparljivih organskih komponenti (VOC).

Analiza uzoraka izduvnih gasova u okviru doktorske disertacije sprovedena gasnohromatografskom tehnikom, korišćenjem fotojonizacionog detektora (*GC/PID*) *in situ* i *online modelom*. Softverski paket (Site Chart) je korišćen za brzu i preciznu obradu dobijenih rezultata.



Slika 4.2. Mobilni gasni hromatograf Voyager–Photovac, sa osnovnim radnim delovima.

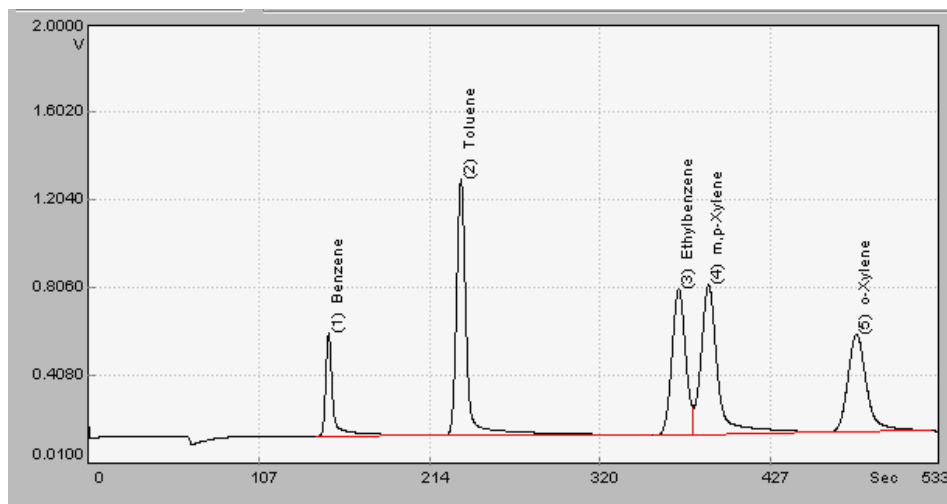
4.7.1. Mobilni gasni hromatograf Voyager–Photovac

Voyager–Photovac, mobilni gasni hromatograf, koristi gasnu hromatografiju kao metodu za razdvajanje i detektovanje lako isparljivih organskih komponenti (VOC) prisutnih u uzorku vazduha. Od mesta injektovanja u gasni hromatograf uzorak je nošen, kroz separacionu kolonu, a zatim kroz detektor strujom inertnog, nosećeg, gasa. Kao noseći gas, koristi se azot ECD čistoće. Kolona mobilnog GC je dugačka cev sa sorptivnim materijalom kojim su u monosloju pokriveni unutrašnji zidovi kolone. Komponente uzorka se razdvajaju na osnovu brzine sorpcije, pri čemu svaka komponenta izlazi iz kolone u detektor sa karakterističnim retencionim vremenom (RV). Detektor odgovara na svaki protok komponente kroz ćeliju detektora. Odgovor detektora dat je nasuprot proteklom vremenu. Na displeju i hromatogramu registruje se serija pikova ispitivanih gasnih komponenti uzorka razdvojenih u vremenu (slika 4.3). Vreme zadržavanja u koloni (RV)

daje kvalitativnu informaciju, dok površina zahvaćena hromatografskim pikom daje kvantitativnu informaciju o količini identifikovane komponente ispitivanog uzorka.

Identiteti i koncentracije koje daje Voyager posle analize uzoraka zasnovane su na vremenu retencije i veličini pikova prethodno analiziranih standarda. Standard svake komponente čuva se u bazi podataka Voyager-a kao vreme retencije, površina pika i koncentracija. Odnos površine pika i koncentracije predstavlja osetljivost na komponentu (meren u mVs/ppm). Informacija o osetljivosti sačuvana u bazi podataka, nakon kalibracije, automatski se ažurira tokom analize nepoznatog uzorka.

U svakoj analizi nepoznatog uzorka, retenciono vreme pika upoređuje se sa retencionim vremenima iz "baze". Ukoliko dolazi do poklapanja retencionih vremena, pik se identifikuje kao odgovarajuća komponenta u bazi podataka. Koncentracija identifikovanog pika računa se deljenjem površine sa osetljivošću za datu komponentu, koja je takođe sačuvana u bazi podataka. Vremena zadržavanja i osetljivosti u "bazi" se obnavljaju pri svakoj narednoj kalibraciji Voyager-a. Softverski sistem Voyager-a računa i odnos novog i starog retencionog vremena za svaku komponentu u kalibracionom gasu. Na slici 4.3 dat je izgled karakterističnog hromatograma standarda za kalibraciju uređaja, smešom BTEX gasova.



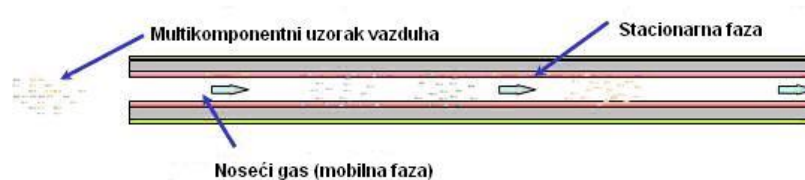
Slika 4.3. Karakterističan hromatogram standarda BTEX gasova.

4.7.2. Uzorkovanje

Ukoliko je na raspolaganju velika zapremina uzorka, kao što je slučaj uzorkovanja izduvnih gasova motornih vozila, automatsko injektiranje vazduha je najjednostavniji način analize, pri čemu uzorak automatski zahvata unutrašnja pumpa Voyager-a.

Kada je pumpa uključena uzorak se "uvlači" kroz ulazni otvor, a zatim u stalnu zapreminu koja se naziva "sample loop". Sample loop ima priključne ventile na svakom kraju. Kada je sample loop pun uzorkovanog gasa, pumpa Voyager-a staje i ventili priključuju jedan kraj sa nosećim gasom, a drugi kraj sa početkom GC kolone. Noseći gas zatim prelazi u kolonu za analizu (slika 4.4).

Da bi se koristilo automatsko injektiranje, pumpi mora biti dostupna dovoljna količina uzorka na atmosferskom pritisku, kako bi se uzorak mogao sprovesti kroz "sample loop" i konekcioni cevovod do kolone za analizu.

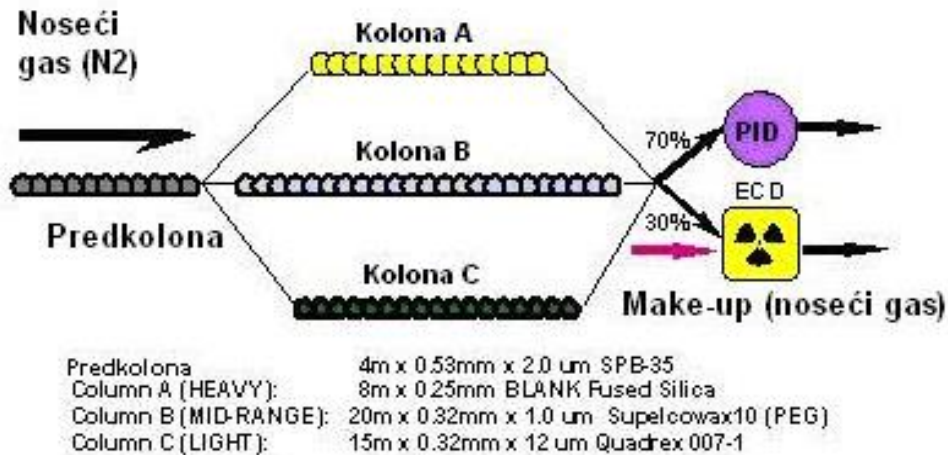


Slika 4.4. Šema separacije u koloni GC.

4.7.3. Kolone Voyagera

Vrsta kolone gasnog hromatografa određuje tipove komponenti uzorka koje mogu biti razdvojene na datoj koloni. Zbog različitih tipova komponenti koje mogu biti analizirane, u GC se instalira nekoliko vrsta kolona kako bi se odabrala odgovarajuća kolona za parcijalnu analizu. Kolone se nalaze u posebnom termostatu koji omogućava preciznu regulaciju temperature. Uređaj je snabdeven i programatorom temperature koji omogućava promenu temperature željenom brzinom u zadatom opsegu.

U Voyager-u su instalirane četiri kolone (predkolona i tri analitičke kolone). Karakteristike separacionih kolona Voyager-a prikazane su na slici 4.5. U TVOC modu sve separacione kolone su premoštene. Uzorak se ubacuje u struju nosećeg gasa i nosi direktno u detektor. Detektor prepoznaje zajednički pik koji definiše mešavinu svih komponenata koje se mogu odrediti.

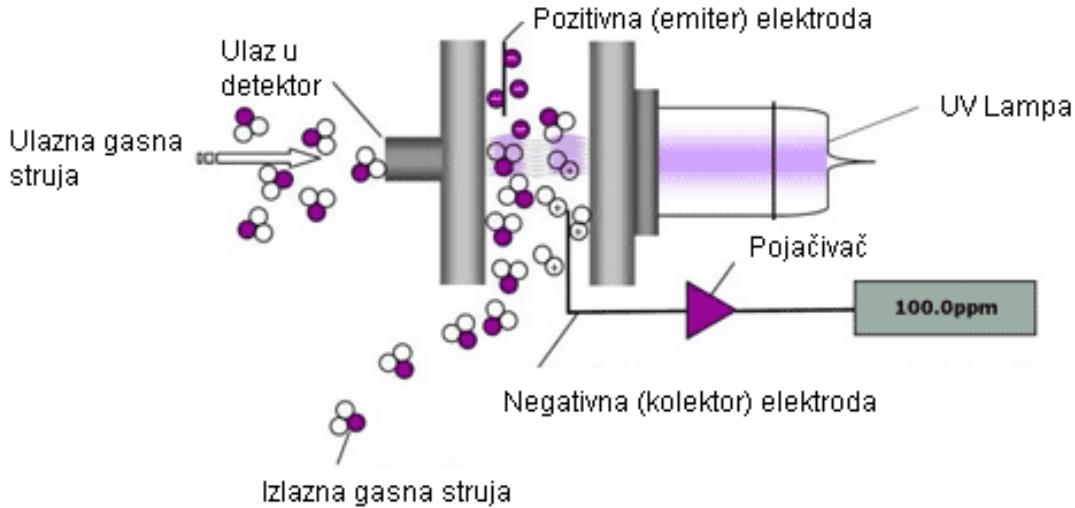


Slika 4.5. Tipovi kolona Voyagera (Photovac, 1997)

4.7.4. Fotojonizacioni detektor- PID

U cilju detekcije BTEX jedinjenja u uzorku smeše izduvnih gasova eksperimentalnog motora korišćen je fotojonizacioni detektor (PID- Photoionization detector). Detektor se sastoji od ćelije, kroz koju protiče efluent i UV lampe koja usmerava UV svetlost unutar ćelije (slika 4.6). UV lampa emituje svetlost talasne dužine 120 nm, energije 10,6 eV. Emitovana svetlost se usmerava na struju nosećeg gasa koji protiče kroz kolonu. Dovođenjem svetlosti određene količine energije ($h\nu$) molekuli gasa mogu biti jonizovani. Da li će molekul biti jonizovan zavisi od jonizacionog potencijala (IP) samog molekula. Ukoliko je IP molekula manji od 10,6 eV molekul će najverovatnije biti jonizovan. Većina osnovnih gasova u vazduhu, uključujući azot N_2 i vodenu paru, imaju IP iznad 12 eV, što znači da noseći gas i sredina uzorka nisu jonizovani. Stalno elektronsko polje se održava između emitujuće i kolektorske elektrode u PID ćeliji. Kada su jednom jonizovani pod dejstvom UV svetlosti, molekuli u PID se kreću u elektronskom polju

ćelije detektora stvarajući naelektrisanje koje je proporcionalno koncentraciji jonizovanih molekula. Elektrometar konvertuje trenutnu vrednost naelektrisanja u voltažu, koja se dalje konvertuje u digitalni signal koji se amplificira u mikroprocesoru.



Slika 4.6. Šema fotojonizacionog detektora (Photovac, 1997).

4.8. Merenja koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja

Merenja koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja su sprovedena na izduvnoj grani eksperimentalnog motora, pri čemu su varirani stehiometrijski odnos u smeši gorivo/vazduh, broj obrtaja i opterećenje eksperimentalnog motora u cilju utvrđivanja zavisnosti radnog režima, operativnih parametara motora SUS i koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja.

Uzorkovanje traje 20 sekundi, dok analiza svake porcije izduvnog gasa traje 20 minuta.

Za gasnohromatografsku detekciju i kvantifikaciju BTEX komponenti u smeši izduvnih gasova eksperimentalnog motora odabrana je kombinacija kolone od polietilen glikola (Supelcowax 10) i PID detektora.

Prilikom kalibracije Voyager-a korišćen je autentični gasni standard Messer Tehnogasa. Kalibraciona smeša BTEX gasova pripremljena je u inertnoj atmosferi azota ECD čistoće, kao nosećeg gasa. Koncentracioni nivoi svih komponenti BTEX gasnog standarda iznosili su 1ppm.

Retenciona vremena BTEX komponenti određena na koloni Supelcowax 10, korišćenjem PID detektora, prikazana su u tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Retenciona vremena BTEX komponenti na koloni Supelcowax 10.

Komponenta	Retenciono vreme [s]
Benzen	284,3
Toluen	482,0
Etilbenzen	825,1
p,m- ksilen	854,4
o- ksilen	1105,0

Eksperimentalna laboratorijska istraživanja u okviru doktorske disertacije sprovedena su u dve kampanje uzorkovanja. U okviru prve kampanje korišćen je motorni benzin proizveden na teritoriji EU, dok je tokom druge kampanje korišćen motorni bezolovni benzin NIS-a. Dobijeni eksperimentalni rezultati ukazuju na zavisnost koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja ne samo od operacionih uslova, već i od vrste korišćenog pogonskog goriva.

5. REZULTATI I DISKUSIJA

Laboratorijska ispitivanja u okviru doktorske disertacije sprovedena su u cilju određivanja funkcionalne zavisnosti koncentracionih nivoa emitovanih BTEX jedinjenja i radnih parametara eksperimentalnog motora radi definisanja modela emisije BTEX jedinjenja prilikom kretanja putničkog automobila u uslovima gradske vožnje. Tokom laboratorijskih ispitivanja praćena su tri radna parametra eksperimentalnog motora: broj obrtaja motora, koeficijent viška vazduha i stepen opterećenja. Posmatran je pojedinačan, a potom i zajednički uticaj operativnih parametara na emisiju BTEX jedinjenja.

Broj obrtaja eksperimentalnog motora (n) variran je u intervalu od 2000 do 3500 (o/min), kao reprezentativnih vrednosti u uslovima gradske vožnje. Koeficijent viška vazduha (λ) je variran u intervalu od 0,85, što odgovara uslovima bogate smeše gorivo/vazduh, do 1,15 što odgovara uslovima siromašne smeše. Opterećenje motora (ξ) je varirano od 10 do 50%, kako bi se eksperimentalnim putem utvrdio uticaj faktora opterećenja na emisiju BTEX jedinjenja, bez obzira na činjenicu da se vozila tokom gradske vožnje uglavnom kreću u uslovima nižeg stepena opterećenja.

Merenja koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja su sprovedena u okviru dve kampanje radi ispitivanja uticaja kvaliteta pogonskog goriva na emisiju BTEX komponenti. Prva kampanja eksperimentalnih merenja je sprovedena korišćenjem goriva Europremium, proizvedenog prema standardima kvaliteta Evropske unije, dok je druga kampanja sprovedena korišćenjem benzina proizvedenog u pogonima Naftne industrije Srbije.

Rezultati laboratorijskih eksperimentalnih ispitivanja prikazani su tabelama datim u Pilogu I i Prilogu II.

5.1. Statistička obrada podataka i interpretacija eksperimentalnih rezultata

Kako bi se pristupilo detaljnijim statističkim obradama, najpre je urađena deskriptivna statistička analiza zavisnih varijabli (koncentracija komponenti) za svaku izmerenu koncentraciju komponenti na obe korišćene vrste goriva. Tokom eksperimentalnih merenja izvršeno je po 150 analiza svakog parametra, za dve različite vrste goriva. Deskriptivni pokazatelji zavisnih varijabli prikazani su u tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Deskriptivni pokazatelji zavisnih varijabli (koncentracija komponenti)

Komponente	NIS- benzin					EUROPREMIUM- benzin				
	N	M _v	SD	Sk	Ku	N	M _v	SD	Sk	Ku
Benzen	150	25,73	13,16	0,57	-0,20	150	20,15	10,42	0,53	0,14
Toluen	150	38,46	27,47	0,90	-0,09	150	39,89	26,12	0,71	-0,28
Etilbenzen	150	4,83	2,73	0,42	-0,41	150	8,35	4,55	0,38	-0,91
m,p-ksilen	150	23,33	15,67	0,68	-0,66	150	27,04	17,82	0,65	-0,73
o-ksilen	150	6,43	4,06	0,67	-0,09	150	9,11	5,51	0,57	-0,58

N-ukupan broj analiza, M_v- srednja vrednost, SD- standardna devijacija, Sk- stepen zakrivljenosti distribucije podataka, Ku- stepen spljoštenosti distribucije podataka

Nakon deskriptivne statističke analize, primetno je da od normalne distribucije podataka ne odstupa značajno ni jedna merena varijabla, na šta ukazuju vrednosti zakrivljenosti (Sk) i spljoštenosti (Ku) distribucije, koje se nalaze unutar opsega od -1 do +1. Date vrednosti su prikazane u tabeli 5.1, zajedno sa ostalim deskriptivnim pokazateljima. Kod goriva Europremium zabeležena je viša prosečna koncentracija svih komponenti, osim koncentracije benzena, čija je srednja vrednost veća kod NIS benzina.

Radi testiranja uticaja promene radnih parametara eksperimentalnog motora na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja, urađene su trofaktorske analize varijanse, za obe korišćene vrste goriva. Nakon toga, radi utvrđivanja korelacija između komponenti, računati su Pirsonovi koeficijenti korelacija.

Kako bi se pristupilo trofaktorskoj analizi varijanse za obe vrste pogonskog goriva, definisani su faktori analize (nezavisne varijable) i nivoi vrednosti samih faktora:

Kao prvi faktor u analizi uzeto je opterećenje motora (ξ), sa tri nivoa:

- 10%
- 30% i
- 50%.

Kao drugi faktor uzet je broj obrtaja motora (n) sa četiri nivoa:

- 2000
- 2500
- 3000 i
- 3500 o/min.

Kao treći faktor uzet je koeficijent viška vazduha (λ) sa tri nivoa:

- 0,85
- 1 i
- 1,15.

Tokom interpretacije dobijenih eksperimentalnih rezultata, najpre su prikazani rezultati analiza pri korišćenju goriva Europremium, a potom i rezultati dobijeni prilikom korišćenja NIS-benzina kao pogonskog goriva.

5.2. EUROPREMIUM benzin

Prva kampanja eksperimentalnih merenja sprovedena je uz korišćenje Europremium benzina kao pogonskog goriva.

Rezultati trofaktorske analize varijanse, koncentracionih nivoa emitovanih BTEX jedinjenja, u zavisnosti od definisanih faktora, prikazani su u tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Rezultati trofaktorske analize varijanse za merene komponente na gorivu Europremium

Faktor	Komponente	SS	df	MS	F	p
ξ (%)	Benzen	1080,384	2	540,192	69,338	0,000
	Toluen	3136,212	2	1568,106	88,915	0,000
	Etilbenzen	11,890	2	5,945	2,146	0,121
	m,p-ksilen	28,353	2	14,176	1,040	0,357
	o-ksilen	6,037	2	3,019	0,673	0,512
n (o/min)	Benzen	173,696	3	57,899	7,432	0,000
	Toluen	1174,808	3	391,603	22,205	0,000
	Etilbenzen	378,307	3	126,102	45,526	0,000
	m,p-ksilen	6904,444	3	2301,481	168,846	0,000
	o-ksilen	387,058	3	129,019	28,746	0,000
λ	Benzen	8714,660	2	4357,330	559,296	0,000
	Toluen	64677,828	2	32338,914	1833,688	0,000
	Etilbenzen	1964,215	2	982,108	354,564	0,000
	m,p-ksilen	30270,026	2	15135,013	1110,364	0,000
	o-ksilen	2846,753	2	1423,376	317,131	0,000
$\xi = f(n)$	Benzen	437,877	4	109,469	14,051	0,000
	Toluen	2253,753	4	563,438	31,948	0,000
	Etilbenzen	7,590	4	1,897	0,685	0,604
	m,p-ksilen	394,246	4	98,562	7,231	0,000
	o-ksilen	19,761	4	4,940	1,101	0,360
$\xi = f(\lambda)$	Benzen	1720,387	4	430,097	55,206	0,000
	Toluen	7968,073	4	1992,018	112,952	0,000
	Etilbenzen	21,044	4	5,261	1,899	0,115
	m,p-ksilen	221,219	4	55,305	4,057	0,004
	o-ksilen	64,656	4	16,164	3,601	0,008
n = f(λ)	Benzen	630,829	6	105,138	13,495	0,000
	Toluen	1875,340	6	312,557	17,723	0,000
	Etilbenzen	48,517	6	8,086	2,919	0,011
	m,p-ksilen	2233,340	6	372,223	27,308	0,000
	o-ksilen	29,945	6	4,991	1,112	0,359
$\xi = f(n, \lambda)$	Benzen	399,283	8	49,910	6,406	0,000
	Toluen	2459,969	8	307,496	17,436	0,000
	Etilbenzen	62,000	8	7,750	2,798	0,007
	m,p-ksilen	1331,167	8	166,396	12,207	0,000
	o-ksilen	84,745	8	10,593	2,360	0,021

SS-suma kvadrata, df- broj stepeni slobode, MS- srednja vrednost kvadrata, F- test statističke značajnosti efekata, p- nivo značajnosti

Tabela 5.2 pokazuje da je glavni efekat faktora opterećenja motora (ξ) prisutan je pri emisiji benzena i toluena: $F(2, 2) = 69,338$, $p < 0,01$, $F(2, 2) = 88,915$, $p < 0,01$, za benzen, odnosno toluen, respektivno.

Uticaji faktora broja obrtaja (n) i koeficijenta viška vazduha (λ), detektovani su pri merenju koncentracija svih posmatranih komponenti, što pokazuju nivoi p-vrednosti iz tabele 5.2, koji su kod svih BTEX jedinjenja manji od 0,05.

Pored pojedinačnog uticaja posmatrani su i zajednički efekti interakcije tri glavna faktora na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja. Interakcija faktora opterećenja motora i broja obrtaja, zabeležena je kod benzena, toluena i m,p-ksilena. Efekti interakcije faktora opterećenja motora i koeficijenta viška vazduha, zabeleženi su kod svih komponenti osim kod etilbenzena, dok su efekti interakcije komponenti broja obrtaja i koeficijenta viška vazduha, uočeni kod svih komponenti, izuzev o-ksilena (tabela 5.2).

Trostruki efekti interakcije svih faktora registrovani su kod svih merenih komponenti (tabela 5.2). Za razliku od glavnih efekata, koji pokazuju samostalan uticaj nezavisne varijable na zavisnu, efekti interakcije govore o združenom delovanju nekoliko faktora, koji zajedno deluju na zavisnu varijablu drugačije nego samostalno. Efekti interakcije su kompleksni za tumačenje i najlakše se interpretiraju preko grafičkih prikaza.

5.2.1. Post-hoc analize

Za faktore na kojima su pronađene statistički značajne razlike u koncentracijama posmatranih komponenti, urađeni su post-hoc testovi radi detektovanja specifičnih grupa, koje se u skladu sa rezultatima testova statistički značajno razlikuju. Rezultati Scheffé post-hoc testova prikazani su za sve detektovane glavne efekte radnih parametara eksperimentalnog motora.

5.2.1.1. Nivo opterećenja

Nivo opterećenja motora, kao samostalan faktor, utiče značajno samo na promene koncentracionih nivoa benzena i toluena, dok kod ostalih komponenti nema statistički značajnih razlika u koncentraciji pri promeni nivoa opterećenja. Tabela 5.3 pokazuje da se koncentracija

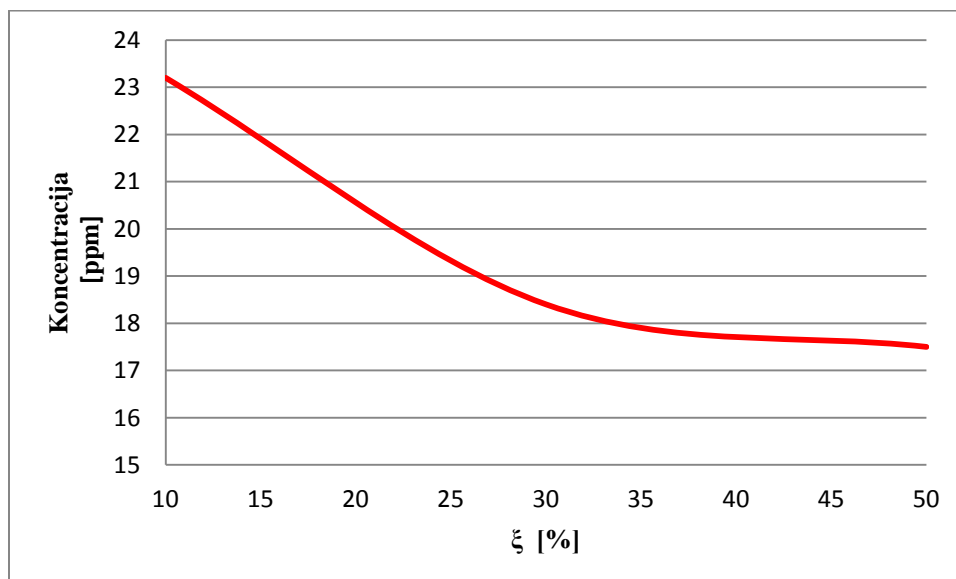
benzena pri opterećenju od 10% značajno razlikuje od one na 30% i 50%, u korist opterećenja od 10%, kada je koncentracija benzena najveća.

Tabela 5.3. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor **Opterećenje motora**

Komponente	Opterećenje	Opterećenje	M	SE	p
Benzen	10%	30%	4,747	0,510	0,000
		50%	5,761	0,624	0,000
	30%	10%	-4,746	0,510	0,000
		50%	1,015	0,624	0,270
	50%	10%	-5,761	0,624	0,000
		30%	-1,015	0,624	0,270
Toluen	10%	30%	7,033	0,767	0,000
		50%	13,996	0,939	0,000
	30%	10%	-7,033	0,767	0,000
		50%	6,963	0,939	0,000
	50%	10%	-13,996	0,939	0,000
		30%	-6,963	0,939	0,000

M-srednja razlika rezultata na dva nivoa opterećenja, SE- standardna greška, p- nivo značajnosti rezultata

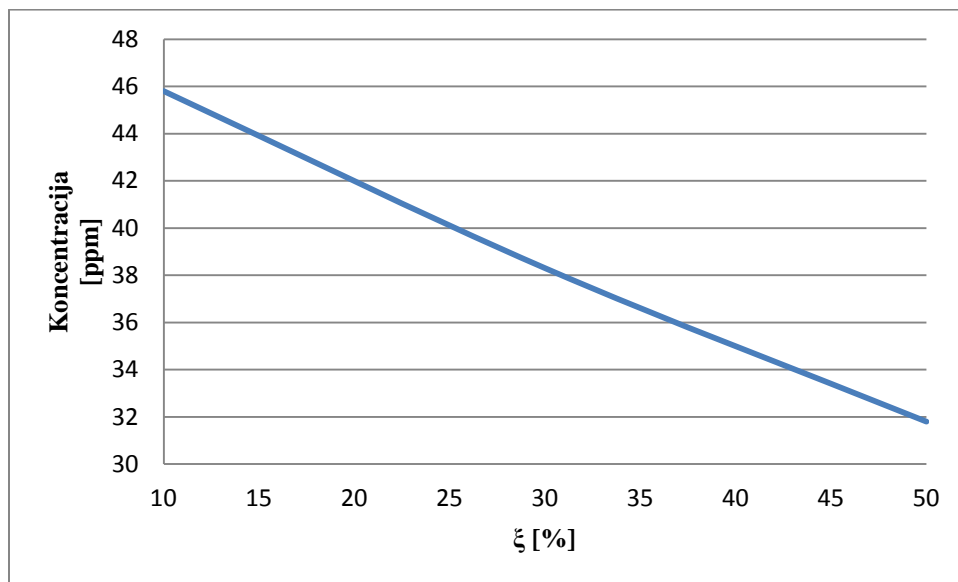
Povećanje stepena opterećenja eksperimentalnog motora utiče na povećanje efikasnosti procesa sagorevanja (Millo i dr., 2014), a samim tim i na sniženje koncentracionih nivoa benzena u smeši izduvnih gasova. Zavisnost koncentracije benzena u funkciji opterećenja motora prikazana je na slici 5.1.



Slika 5.1. Koncentracija benzena u funkciji opterećenja motora

Primetno je da se koncentracija benzena ne menja značajno poređenjem koncentracionih nivoa na opterećenjima od 30% i 50%, na šta ukazuju i vrednosti parametara, date u tabeli 5.3, koje imaju nivo p vrednosti manji od 0,05.

Postoje značajne razlike u koncentraciji toluena na sva tri nivoa opterećenja, pri čemu je najviša koncentracija detektovana na 10%, a opada na opterećenjima od 30% i 50%, što ukazuje na fenomen da stepen opterećenja motora, kao samostalan faktor, pozitivno utiče na povećanje efikasnosti procesa sagorevanja i sniženje koncentracionih nivoa toluena u smeši izduvnih gasova. Zavisnost koncentracije toluena u funkciji opterećenja prikazana je na slici 5.2.



Slika 5.2. Koncentracija toluena u funkciji opterećenja motora

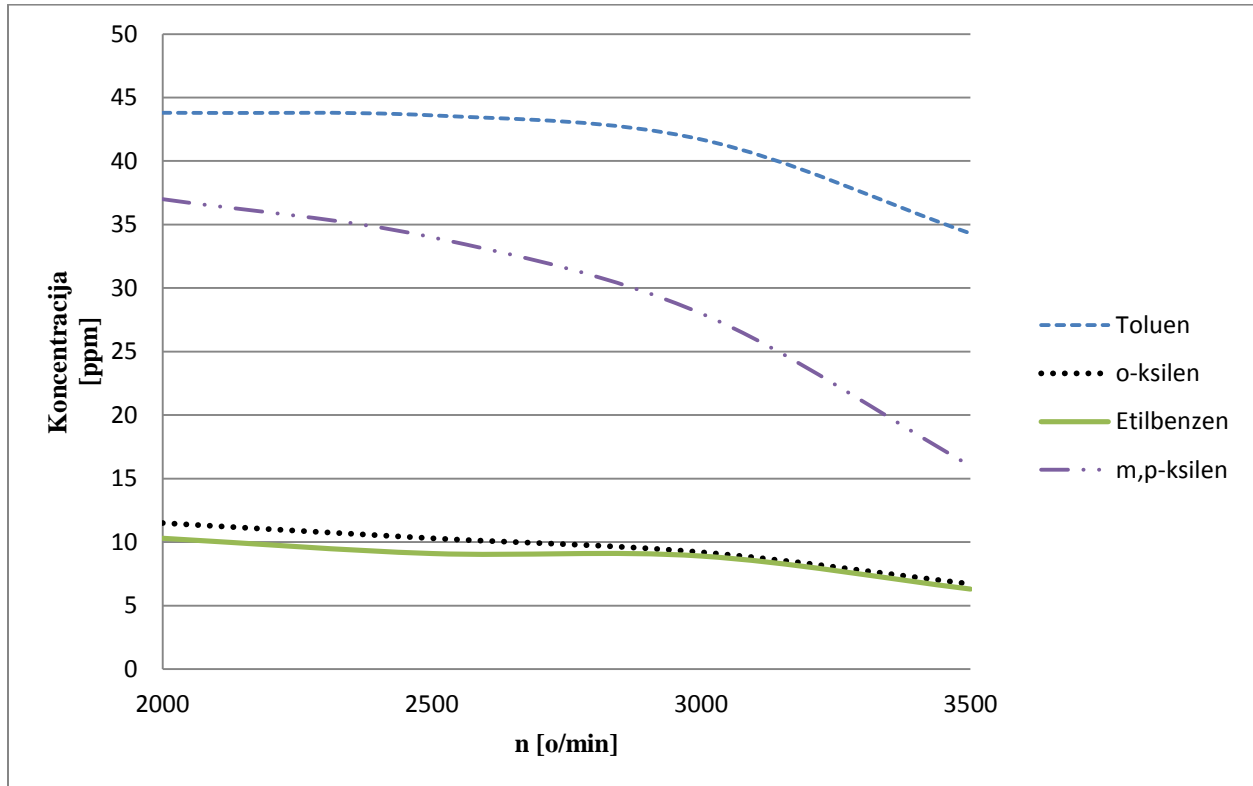
5.2.1.2. Broj obrtaja eksperimentalnog motora

Ne postoje statistički značajne razlike u koncentracijama benzena posmatrano samo u odnosu na faktor broja obrtaja motora. Rezultati post-hoc testa prikazani u tabeli 5.4 pokazuju da su sve p vrednosti za benzen veće od 0,05.

Tabela 5.4. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor **Broj obrtaja motora (n)**

Komponenta	n (o/min)	n (o/min)	M	SE	p
Benzen	2000	2500	-1,025	0,721	0,569
		3000	-0,892	0,658	0,608
		3500	-1,571	0,658	0,133
	2500	2000	1,025	0,721	0,569
		3000	0,133	0,658	0,998
		3500	-0,546	0,658	0,876
	3000	2000	0,892	0,658	0,608
		2500	-0,133	0,658	0,998
		3500	-0,679	0,588	0,722
	3500	2000	1,571	0,658	0,133
		2500	0,546	0,658	0,876
		3000	0,679	0,588	0,722
Toluen	2000	2500	0,580	1,084	0,962
		3000	2,872	0,989	0,043
		3500	9,328	0,989	0,000
	2500	2000	-0,580	1,084	0,962
		3000	2,292	0,989	0,153
		3500	8,748	0,989	0,000
	3000	2000	-2,872	0,989	0,043
		2500	-2,292	0,989	0,153
		3500	6,456	0,885	0,000
	3500	2000	-9,328	0,989	0,000
		2500	-8,748	0,989	0,000
		3000	-6,456	0,885	0,000
Etilbenzen	2000	2500	1,311	0,429	0,029
		3000	1,553	0,392	0,002
		3500	4,302	0,392	0,000
	2500	2000	-1,311	0,429	0,029
		3000	0,242	0,392	0,944
		3500	2,991	0,392	0,000
	3000	2000	-1,553	0,392	0,002
		2500	-0,242	0,392	0,944
		3500	2,749	0,351	0,000
	3500	2000	-4,302	0,392	0,000
		2500	-2,991	0,392	0,000
		3000	-2,749	0,351	0,000
m,p-ksilen	2000	2500	3,088	0,953	0,018
		3000	7,788	0,870	0,000
		3500	18,979	0,870	0,000
	2500	2000	-3,088	0,953	0,018
		3000	4,699	0,870	0,000
		3500	15,891	0,870	0,000
	3000	2000	-7,787	0,870	0,000
		2500	-4,699	0,870	0,000
		3500	11,191	0,778	0,000
	3500	2000	-18,979	0,870	0,000
		2500	-15,891	0,870	0,000
		3000	-11,191	0,778	0,000
o-ksilen	2000	2500	1,379	0,547	0,101
		3000	2,418	0,499	0,000
		3500	4,832	0,499	0,000
	2500	2000	-1,379	0,547	0,101
		3000	1,039	0,499	0,234
		3500	3,453	0,499	0,000
	3000	2000	-2,418	0,499	0,000
		2500	-1,039	0,499	0,234
		3500	2,414	0,447	0,000
	3500	2000	-4,832	0,499	0,000
		2500	-3,453	0,499	0,000
		3000	-2,414	0,447	0,000

Analizom nezavisnog uticaja faktora broja obrtaja na koncentracione nivoe ostalih jedinjenja BTEX grupe, zapaža se opadajući trend koncentracionih nivoa sa povećanjem broja obrtaja eksperimentalnog motora, kako ilustruje slika 5.3.



Slika 5.3. Zavisnost koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja od broja obrtaja motora

Kod toluena su zabeležene statistički značajne razlike u koncentraciji pri poređenju sledećih brojeva obrtaja motora: 2000 i 3000, 2000 i 3500, 2500 i 3500, kao i 3000 i 3500. Isti slučaj je i sa o-ksilenom. Posmatrajući koncentracione nivoe etilbenzena, primetne su statistički značajne razlike u koncentracijama pri poređenju broja obrtaja 2000 sa 2500, 3000 i 3500, dok je kod m,p-ksilena primetno da se poređenjem sva četiri nivoa vrednosti broja obrtaja motora, koncentracije statistički značajno razlikuju.

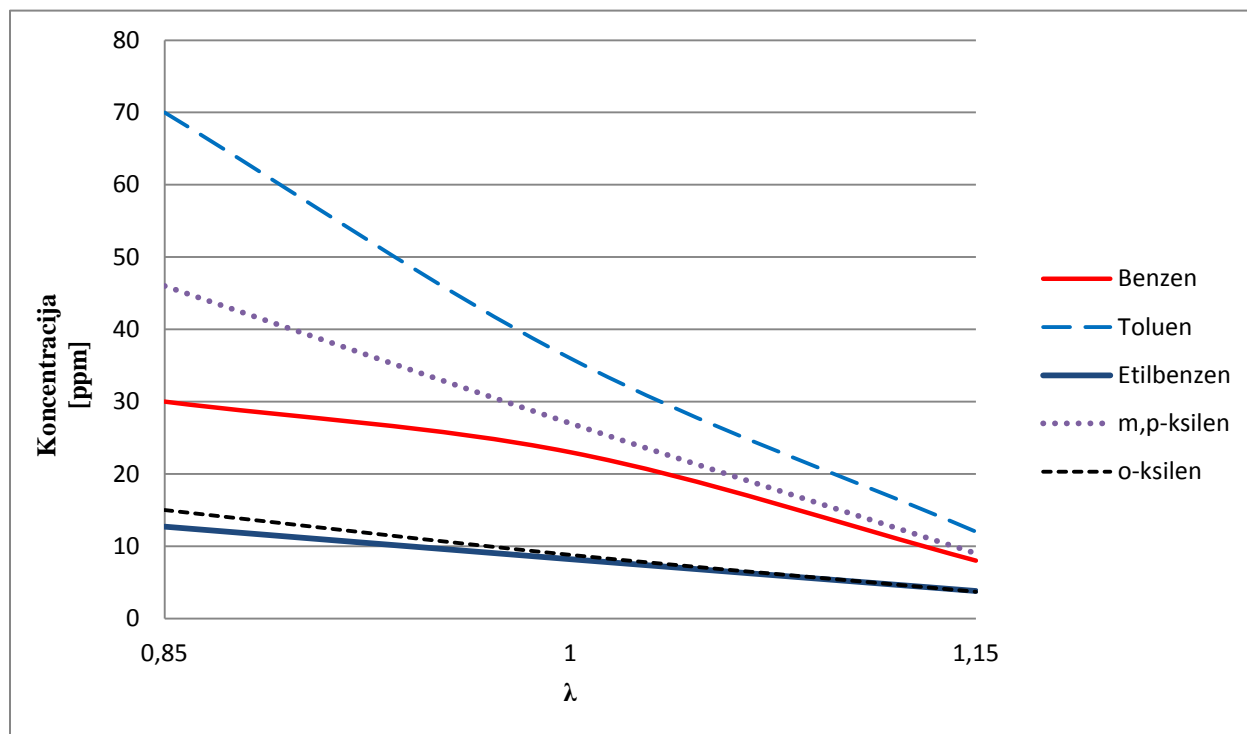
5.2.1.3. Koeficijent viška vazduha - λ

Analizirajući razlike u koncentracijama komponenti izduvni gasova, u odnosu na koeficijent viška vazduha, evidentno je da se koncentracije statistički značajno razlikuju u sva tri nivoa faktora, za svih pet posmatranih komponenti, kao što prikazuje tabela 5.5.

Tabela 5.5. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor **Koeficijent viška vazduha**

Komponenta	Opterećenje	Opterećenje	M	SE	P
Benzen	0,85	1	7,478	0,558	0,000
		1,15	20,953	0,558	0,000
	1	0,85	-7,478	0,558	0,000
		1,15	13,475	0,558	0,000
	1,15	0,85	-20,953	0,558	0,000
		1	-13,475	0,558	0,000
Toluen	0,85	1	33,348	0,839	0,000
		1,15	56,687	0,839	0,000
	1	0,85	-33,348	0,839	0,000
		1,15	23,339	0,839	0,000
	1,15	0,85	-56,687	0,839	0,000
		1	-23,339	0,839	0,000
Etilbenzen	0,85	1	5,3137	0,333	0,000
		1,15	9,395	0,333	0,000
	1	0,85	-5,314	0,333	0,000
		1,15	4,082	0,333	0,000
	1,15	0,85	-9,395	0,333	0,000
		1	-4,082	0,333	0,000
m,p-ksilen	0,85	1	20,643	0,738	0,000
		1,15	36,214	0,738	0,000
	1	0,85	-20,643	0,738	0,000
		1,15	15,572	0,738	0,000
	1,15	0,85	-36,214	0,738	0,000
		1	-15,572	0,738	0,000
o-ksilen	0,85	1	6,547	0,424	0,000
		1,15	11,449	0,424	0,000
	1	0,85	-6,547	0,424	0,000
		1,15	4,903	0,424	0,000
	1,15	0,85	-11,449	0,424	0,000
		1	-4,903	0,424	0,000

Grafički prikaz razlika u koncentracionim nivoima BTEX jedinjenja za različite vrednosti koeficijenta viška vazduha predstavljen je na slici 5.4.

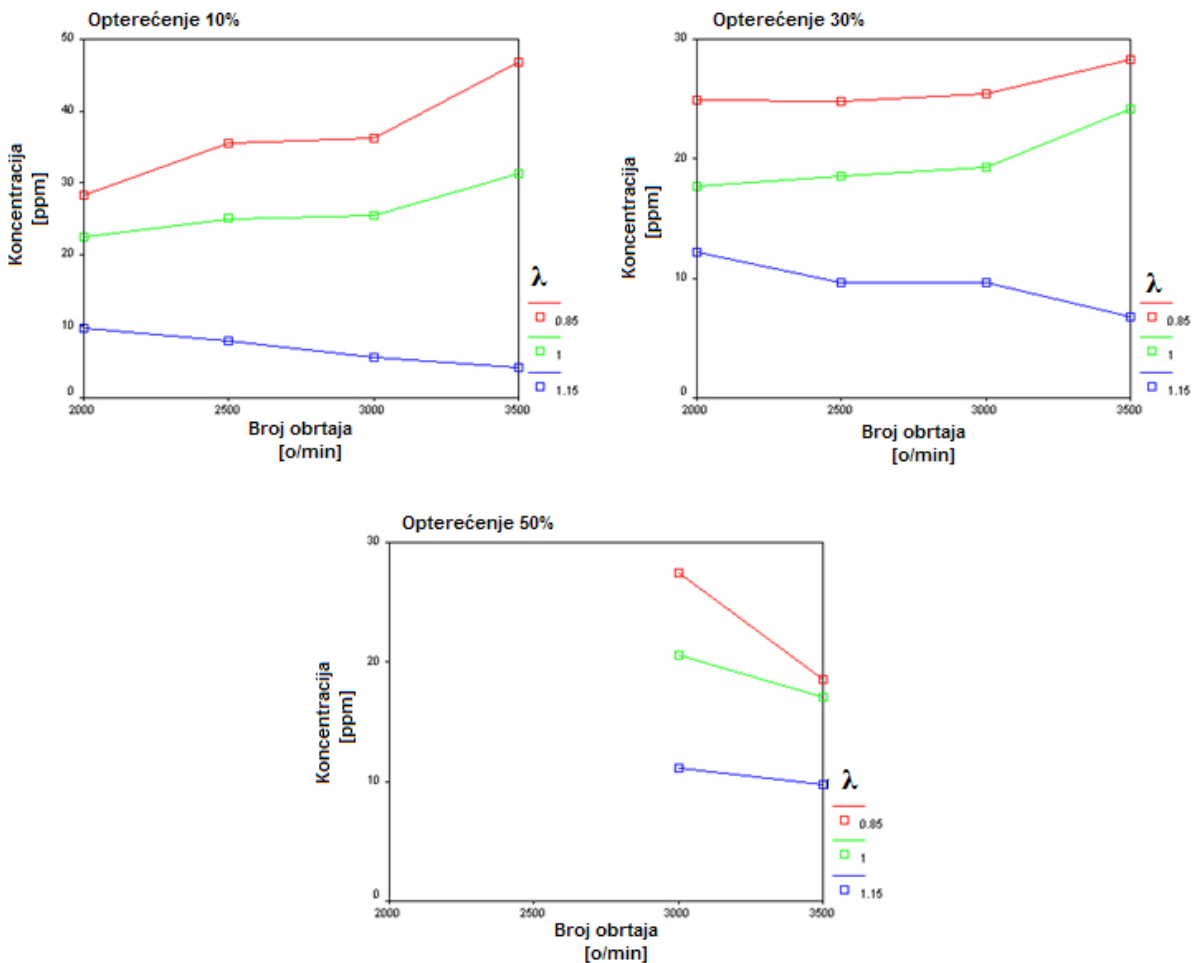


Slika 5.4. Koncentracije BTEX jedinjenja u funkciji koeficijenta viška vazduha

Povećanjem koeficijenta viška vazduha ostvaruju se povoljniji uslovi u komori za sagorevanje (Colls, 2002; Barth i dr., 2000; Flagan i Seinfeld, 1988), što rezultuje sniženjem koncentracionih nivoa svih jedinjenja BTEX grupe. Najznačajniji efekat nezavisnog povećanja količine vazduha u napojnoj smeši ostvaren je kroz sniženje koncentracionih nivoa toluena u smeši izduvnih gasova od približno 85% u odnosu na početne uslove, koji odgovaraju bogatoj napojnoj smeši gorivo/vazduh. Značajna redukcija koncentracionih nivoa postiže se i kod benzena i m,p-ksilena, dok je namanji efekat povećanja λ -faktora zabeležen kod etilbenzena i o-ksilena.

5.2.2. Efekti interakcije drugog i trećeg reda

U prethodnim analizama praćen je parcijalni uticaj svakog faktora na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja. Veoma su značajni efekti zajedničkog delovanja operativnih parametara na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja. Interakcije drugog i trećeg reda između posmatranih faktora i uticaj na koncentracione nivoe za svaku posmatranu komponentu iz grupe BTEX prikazan je na slikama od 5.5 do 5.9.



Slika 5.5. Koncentracija benzena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

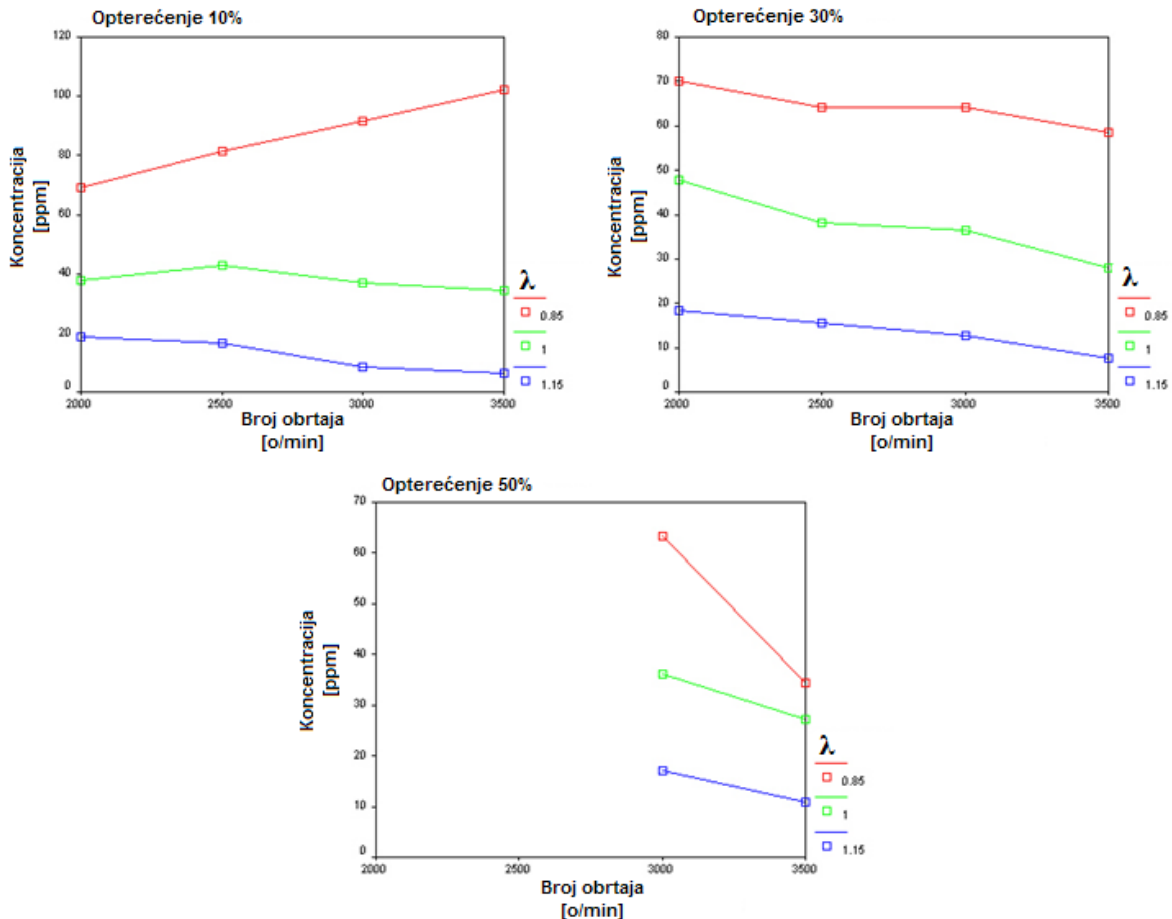
Slika 5.5 pokazuje efekat zajedničke interakcije svih posmatranih faktora (radnih parametara eksperimentalnog motora) na koncentracione nivoe benzena. U uslovima nižih i srednjih nivoa

opterećenja, 10% i 30%, koncentracija benzena u zavisnosti od vrednosti koeficijenta viška vazduha i broja obrtaja motora menja se na sličan način, dok se drugačiji trend promene koncentracija zapaža pri opterećenju od 50%. U uslovima bogate ($\lambda=0,85$) i stehiometrijske smeše gorivo/vazduh ($\lambda=1$), na opterećenjima 10 i 30% koncentracija benzena pokazuje trend rasta sa povećanjem broja obrtaja eksperimentalnog motora, dok se za iste vrednosti koeficijenta viška vazduha koncentracija benzena smanjuje sa povećanjem broja obrtaja pri opterećenju od 50%.

U uslovima siromašne radne smeše ($\lambda=1,15$) koncentracija benzena opada sa povećanjem broja obrtaja motora, bez obzira na stepen opterećenja.

Uočeni trend povišenja koncentracionih nivoa benzena sa povećanjem broja obrtaja u uslovima nižeg stepena opterećenja (10%) ukazuje na emitovanje većih količina benzena kao produkta nepotpunog sagorevanja bogate smeše gorivo/vazduh ($\lambda=0,85$). U uslovima stehiometrijske smeše ($\lambda=1$) i nižih i srednjih opterećenja (10 i 30%) uočen je sličan trend povišenja koncentracionih nivoa benzena sa povećanjem broja obrtaja eksperimentalnog motora, najverovatnije kao rezultat dealkilacije viših aromata do benzena kao konačnog produkta (Kaiser i dr., 1991; Schuetzle i dr., 1994; Hasan i dr., 2011). U uslovima viših opterećenja (50%), sa povećanjem broja obrtaja motora ostvaruju se povoljniji uslovi za potpuno sagorevanje smeše gorivo/vazduh, što utiče na sniženje koncentracionih nivoa benzena bez obzira na vrednosti koeficijenta viška vazduha.

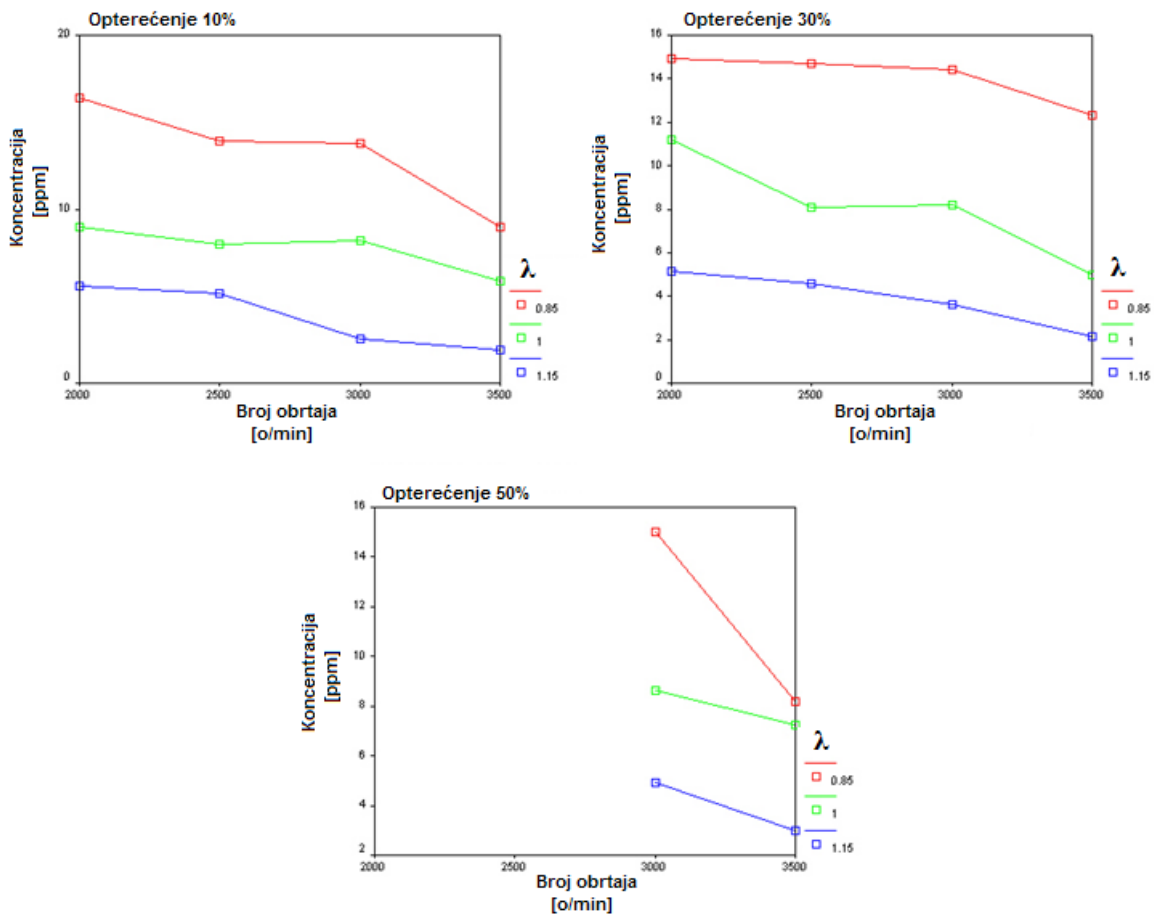
Slika 5.6. pokazuje zajednički uticaj opterećenja, koeficijenta viška vazduha i broja obrtaja eksperimentalnog motora na koncentracione nivoe toluena.



Slika 5.6. Koncentracija toluena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

U uslovima nižeg stepena opterećenja i bogate napojne smeše uočava se različit trend promene koncentracije toluena u odnosu na ostale eksperimentalne uslove. Pri opterećenju 10%, u uslovima bogate smeše ($\lambda=0,85$), postoji trend povišenja koncentracionih nivoa toluena sa povećanjem broja obrtaja eksperimentalnog motora, pre svega kao rezultat nepotpunog sagorevanja bogate napojne smeše. Povećanje vrednosti koeficijenta viška vazduha, stepena opterećenja i broja obrtaja eksperimentalnog motora utiče na sniženje koncentracionih nivoa

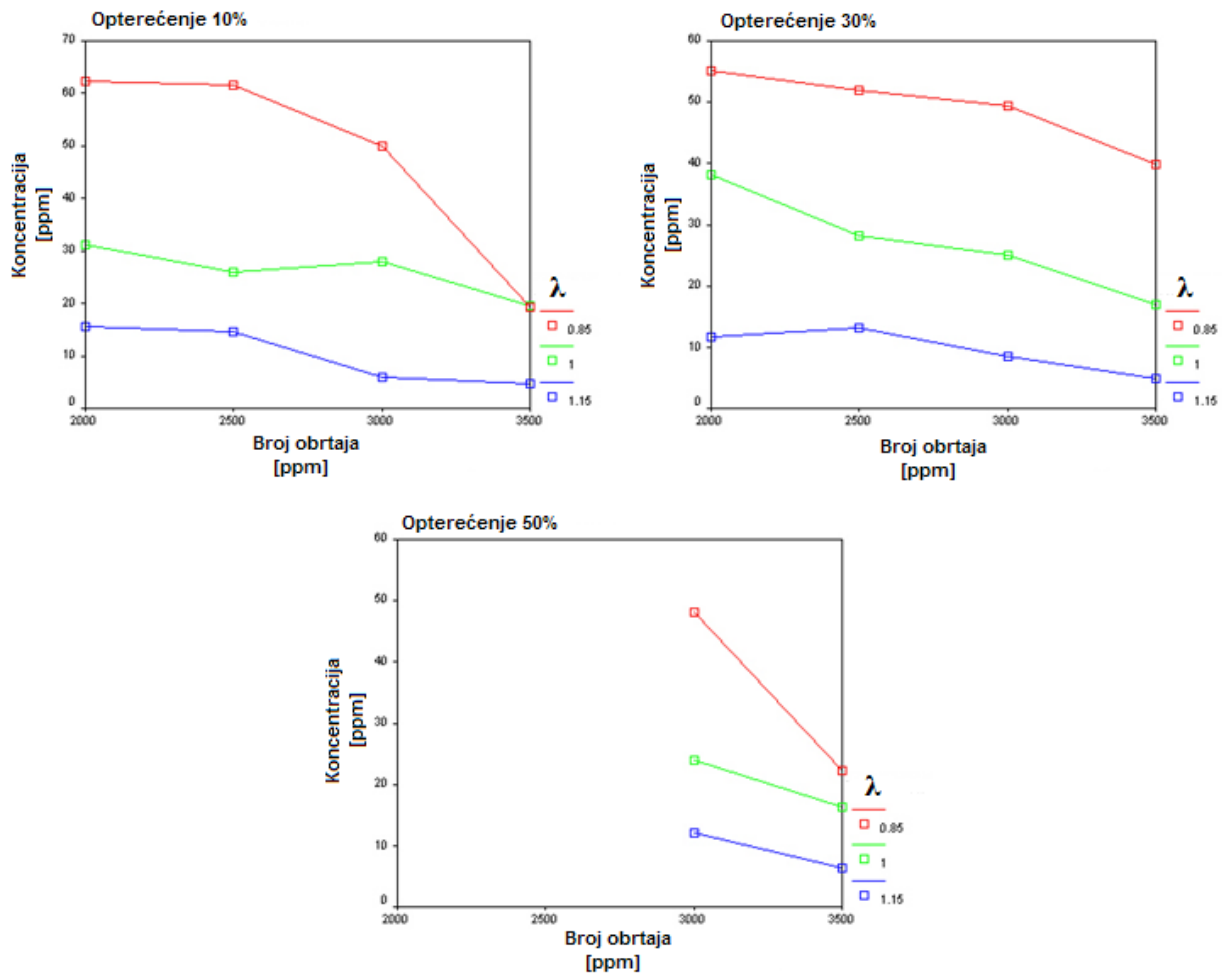
toluena u smeši izduvnih gasova, što se može uočiti na slici 5.6. Najviši koncentracioni nivoi toluena detektovani su u uslovima nižeg stepena opterećenja i bogate smeše gorivo/vazduh (102 ppm), dok su najniže prosečne koncentracije (11 ppm) tokom kampanje detektovane u uslovima velikog viška vazduha, visokog stepena opterećenja i velikih brojeva obrtaja motora koji omogućavaju potpunije sagorevanje napojne smeše.



Slika 5.7. Koncentracija etilbenzena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

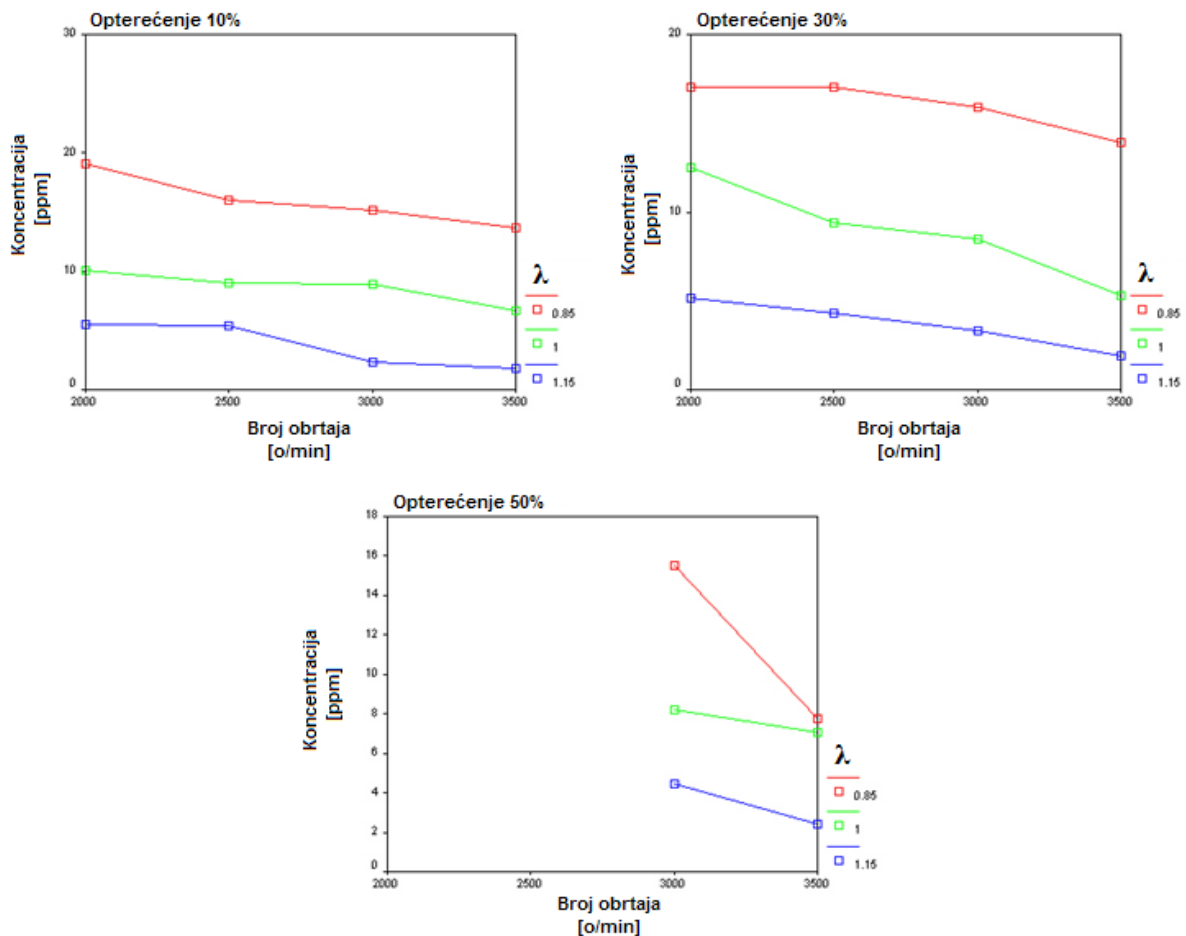
Povećanjem vrednosti koeficijenta viška vazduha, broja obrtaja eksperimentalnog motora i stepena opterećenja obezbeđuju se povoljni uslovi za potpunije sagorevanje napojne smeše (Zervas i dr., 2004), što rezultuje opadajućim trendom vrednosti koncentracionih nivoa etilbenzena prikazanih na slici 7. Najviše koncentracije etilbenzena detektovane su pri niskom stepenu opterećenja (10%) i malom broju obrtaja eksperimentalnog motora (2000 o/min) u

uslovima koji odgovaraju bogatoj napojnoj smeši ($\lambda=0,85$). Prosečna vrednost koncentracija etilbenzena u navedenim uslovima iznosila je 16,4 ppm. Najniže koncentracije etilbenzena detektovane su u uslovima visokog stepena opterećenja (50%) i velikog broja obrtaja (3500 o/min) u uslovima siromašne napojne smeše ($\lambda=1,15$). Prosečna vrednost koncentracije etilbenzena iznosila je 2,392 ppm. Tokom kampanje uočen je značajan uticaj radnih parametara motora na koncentracione nivoe etilbenzena u izduvnim gasovima. Detektovano je sniženje koncentracionih nivoa etilbenzena od 85% u odnosu na početne uslove, koji odgovaraju bogatoj smeši gorivo/vazduh.



Slika 5.8. Koncentracija m,p-ksilena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Trend opadajućih vrednosti koncentracija sa osiromašenjem napojne smeše, povećanjem broja obrtaja i opterećenja eksperimentalnog motora može se uočiti i kod m,p-ksilena, slika 5.8. Najviše vrednosti koncentracija m,p-ksilena (62,4 ppm) su detektovane u uslovima bogate napojne smeše ($\lambda=0,85$), niskog opterećenja (10%) i malog broja obrtaja eksperimentalnog motora (2000 o/min). Veoma značajan uticaj zajedničkog delovanja radnih parametara na koncentracione nivoe m,p-ksilena ogleda se kroz redukciju početne koncentracije od skoro 90% u uslovima u kojima je obezbeđen višak vazduha i velik broj obrtaja eksperimentalnog motora. Koncentracioni nivoui m,p-ksilena u uslovima obezbeđenog viška vazduha ($\lambda=1,15$) i velikog broja obrtaja (3500 o/min) kreću se u intervalu od 4,823 do 6,435 ppm.



Slika 5.9. Koncentracija o-ksilena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slično ponašanje i zavisnost koncentracionih nivoa od operativnih parametara eksperimentalnog motora pokazuje i o-ksilen. Koncentracija o-ksilena opada sa povećanjem vrednosti koeficijenta viška vazduha, opterećenja i broja obrtaja eksperimentalnog motora. Najviše vrednosti koncentracija o-ksilena (19,1 ppm) detektovane su u uslovima bogate smeše ($\lambda=0,85$), niskog stepena opterećenja (10%) i malog broja obrtaja eksperimentalnog motora (2000 o/min). Osiromašenjem napojne smeše (povećanjem vrednosti λ -faktora), povećanjem opterećenja i broja obrtaja motora postignuta je redukcija koncentracionih nivoa o-ksilena od 90% u odnosu na početne uslove, kao i u slučaju m,p-ksilena. Prosečne vrednosti koncentracija o-ksilena detektovane u uslovima siromašne napojne smeše nalaze se u opsegu od 1,854 do 2,392 ppm.

5.3. NIS- benzin

U cilju procene uticaja upotrebljene vrste goriva na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja u smeši izduvnih gasova, pod istim eksperimentalnim uslovima, sprovedena je druga kampanja merenja koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja, uz korišćenje NIS benzina kao pogonskog goriva.

Rezultati trofaktorske analize varijanse, za svaku od pet merenih komponenti, u zavisnosti od tri posmatrana faktora prikazani su tabeli 5.6.

Tabela 5.6. Rezultati trofaktorske analize varijanse za merene komponente na gorivu NIS-a

Faktor	Komponente	SS	df	MS	F	p
ξ (%)	Benzen	2003,979	2	1001,990	94,766	0,000
	Toluen	8556,888	2	4278,444	358,886	0,000
	Etilbenzen	21,112	2	10,556	6,945	0,001
	m,p-ksilen	1298,645	2	649,322	71,612	0,000
	o-ksilen	144,162	2	72,081	35,576	0,000
n (o/min)	Benzen	377,988	3	125,996	11,916	0,000
	Toluen	40,768	3	13,589	1,140	0,336
	Etilbenzen	96,130	3	32,043	21,083	0,000
	m,p-ksilen	1346,799	3	448,933	49,512	0,000
	o-ksilen	118,454	3	39,485	19,488	0,000
λ	Benzen	15843,059	2	7921,530	749,202	0,000
	Toluen	71197,274	2	35598,637	2986,097	0,000
	Etilbenzen	680,093	2	340,047	223,736	0,000
	m,p-ksilen	26787,749	2	13393,874	1477,182	0,000
	o-ksilen	1460,425	2	730,213	360,405	0,000
$\xi = f(n)$	Benzen	244,004	4	61,001	5,769	0,000
	Toluen	737,482	4	184,371	15,465	0,000
	Etilbenzen	6,824	4	1,706	1,123	0,349
	m,p-ksilen	207,084	4	51,771	5,710	0,000
	o-ksilen	12,546	4	3,136	1,548	0,193
$\xi = f(\lambda)$	Benzen	1890,810	4	472,702	44,707	0,000
	Toluen	10135,151	4	2533,788	212,540	0,000
	Etilbenzen	7,603	4	1,901	1,251	0,293
	m,p-ksilen	1194,083	4	298,521	32,923	0,000
	o-ksilen	141,486	4	35,371	17,458	0,000
n = f(λ)	Benzen	804,146	6	134,024	12,676	0,000
	Toluen	3517,917	6	586,320	49,182	0,000
	Etilbenzen	2,385	6	0,398	0,262	0,954
	m,p-ksilen	107,933	6	17,989	1,984	0,073
	o-ksilen	5,148	6	0,858	0,423	0,862
$\xi = f(n, \lambda)$	Benzen	114,409	8	14,301	1,353	0,224
	Toluen	931,089	8	116,386	9,763	0,000
	Etilbenzen	6,497	8	0,812	0,534	0,829
	m,p-ksilen	104,069	8	13,009	1,435	0,189
	o-ksilen	5,294	8	0,662	0,327	0,954

Kao što tabela 5.6 pokazuje, glavni efekat faktora opterećenja motora prisutan je pri merenju koncentracija svih komponenti, kao i efekat koeficijenta viška vazduha. Značajan efekat uticaja broja obrtaja na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja registrovan je kod svih merenih komponenti, osim kod toluena (na šta ukazuju vrednosti p nivoa iz tabele 5.6, koji je kod datih komponenti manji od 0,05).

Praćeni su i efekti interakcije tri glavne komponente. Interakcija faktora opterećenja motora i broja obrtaja, zabeležena je kod benzena, toluena i m,p-ksilena. Efekti interakcije faktora opterećenja motora i koeficijenta viška vazduha, zabeleženi su kod svih komponenti osim kod etilbenzena ($p < 0,05$), dok su efekti interakcije faktora broja obrtaja i koeficijenta viška vazduha, pronađeni su samo kod benzena i toluena.

Trostruki efekti inetrakcije svih variranih fakora detektovani su samo kod toluena.

5.3.1. Post hoc analize

Za faktore na kojima su kvantifikovane statistički značajne razlike u koncentracijama posmatranih komponenti, urađeni su Scheffe post-hoc testovi, radi detektovanja specifičnih grupa koje se statistički značajno razlikuju.

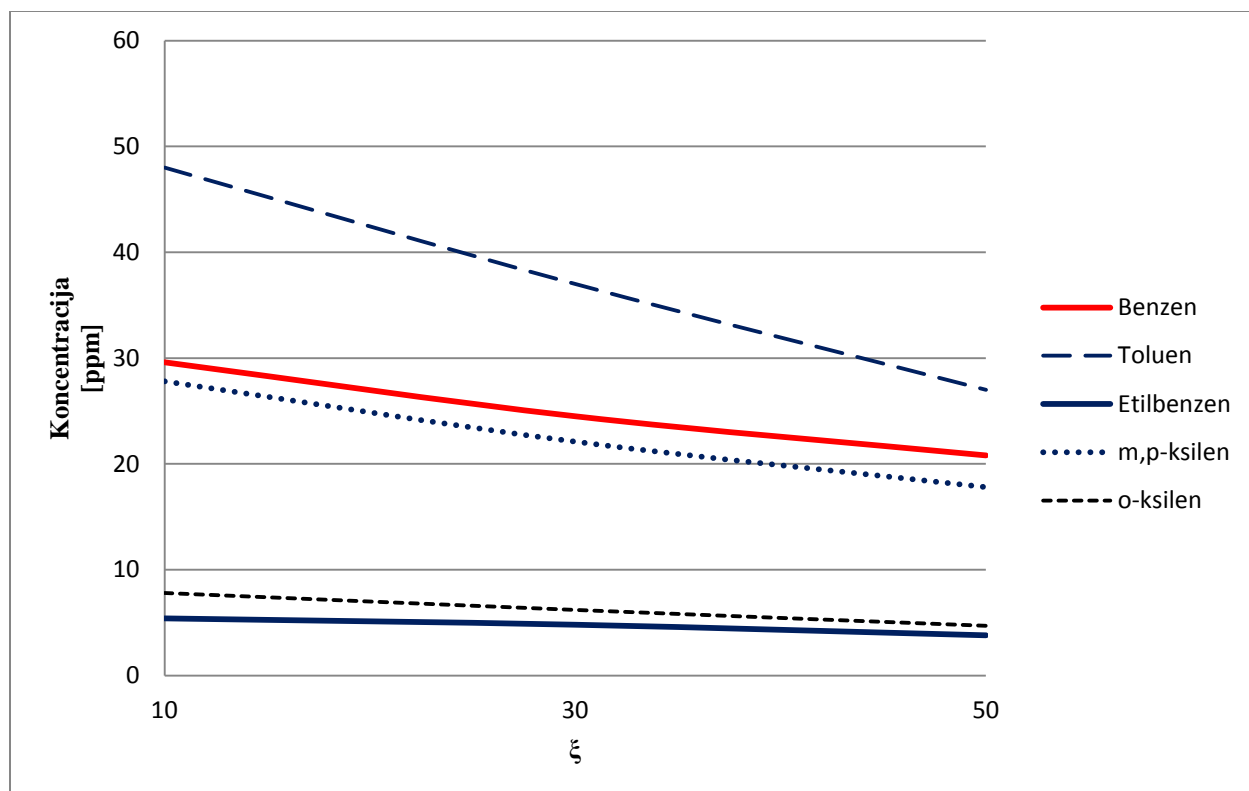
5.3.1.1. Nivo opterećenja

Nivo opterećenja motora, kao samostalan faktor, utiče značajno na promene u koncentraciji svih posmatranih komponenti. Rezultati post-hoc testova prikazani u tabeli 5.7 pokazuju da se koncentracije svih jedinjenja iz grupe BTEX pri različitim nivoima opterećenja, statistički značajno razlikuju. Posmatrajući uticaj nivoa opterećenja, kao samostalnog faktora, na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja primetno je da se koncentracije svih komponenti statistički značajno menjaju u zavisnosti od opterećenja motora. Koncetracije komponenti su najveće pri opterećenju od 10%. Sa povećanjem opterećenja koncetracije svih BTEX jedinjenja se smanjuju, tako da su najniže vrednosti koncentracija detektovane pri opterećenju od 50%.

Tabela 5.7. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor **Opterećenje motora**

Komponenta	Opterećenje	Opterećenje	M	SE	p
Benzen	10%	30%	5,102	0,593	0,000
		50%	8,672	0,727	0,000
	30%	10%	-5,102	0,593	0,000
		50%	3,569	0,727	0,000
	50%	10%	-8,672	0,727	0,000
		30%	-3,569	0,727	0,000
Toluen	10%	30%	12,218	0,630	0,000
		50%	20,313	0,772	0,000
	30%	10%	-12,218	0,630	0,000
		50%	8,094	0,772	0,000
	50%	10%	-20,313	0,772	0,000
		30%	-8,094	0,772	0,000
Etilbenzen	10%	30%	0,698	0,225	0,010
		50%	1,672	0,275	0,000
	30%	10%	-0,698	0,225	0,010
		50%	0,974	0,275	0,003
	50%	10%	-1,672	0,275	0,000
		30%	-,974	0,275	0,003
m,p-ksilen	10%	30%	5,501	0,549	0,000
		50%	10,069	0,673	0,000
	30%	10%	-5,501	0,549	0,000
		50%	4,567	0,673	0,000
	50%	10%	-10,069	0,673	0,000
		30%	-4,567	0,673	0,000
o-ksilen	10%	30%	1,739	0,259	0,000
		50%	3,343	0,318	0,000
	30%	10%	-1,739	0,259	0,000
		50%	1,604	0,318	0,000
	50%	10%	-3,343	0,318	0,000
		30%	-1,604	0,318	0,000

Nezavisan uticaj nivoa opterećenja eksperimentalnog motora na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja, pri korišćenju NIS- benzina, prikazan je na slici 5.10.



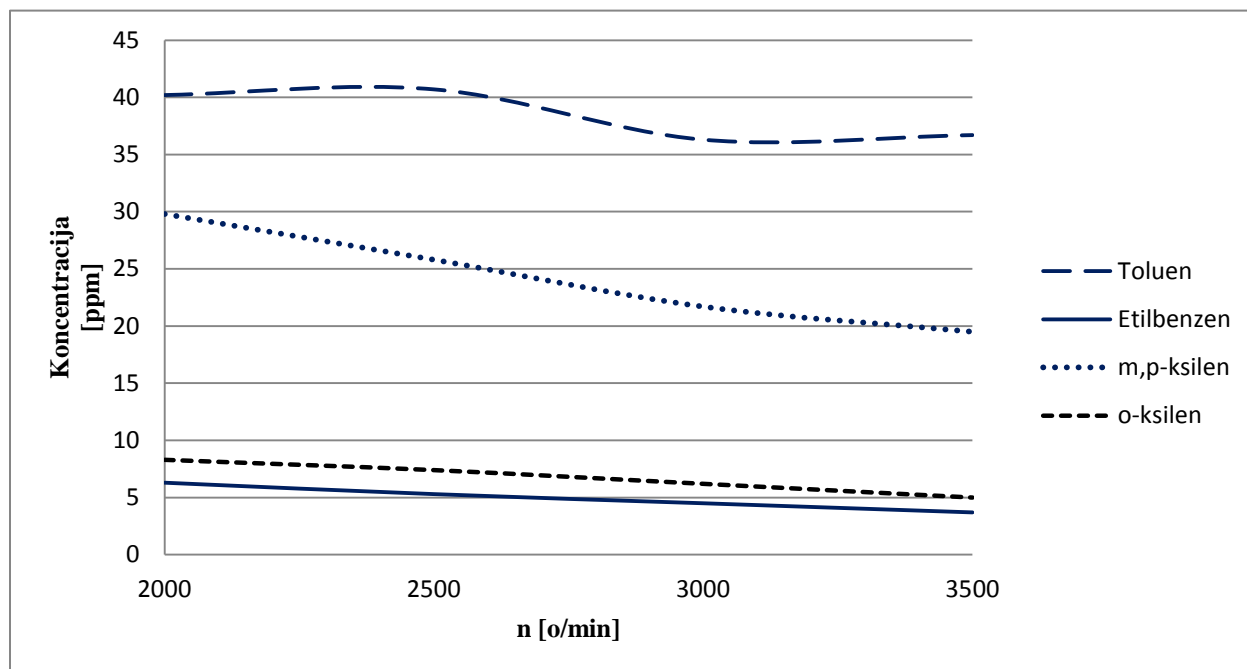
Slika 5.10. Koncentracija BTEX jedinjenja u funkciji opterećenja motora

5.3.1.2. Broj obrtaja eksperimentalnog motora

Ne postoje statistički značajne razlike u koncentracijama benzena, analizirano samo u odnosu na faktor broja obrtaja motora na šta ukazuju rezultati post-hoc testa prikazani u tabeli 5.8. Kod toluena je zabeleženo da se statistički značajne razlike u koncentraciji dobijaju pri poređenju sledećih brojeva obrtaja: 2000 i 3000, 2000 i 3500, 2500 i 3000, kao i 2500 i 3500. Koncentracioni nivoi etilbenzena se statistički značajno razlikuju pri poređenju brojeva obrtaja 2000 i 2500, 3000 i 3500, kao i 2500 i 3500. Koncentracije m,p-ksilena se statistički značajno razlikuju pri svim vrednostima brojeva obrtaja motora. Analizom razlika u koncentracijama o-ksilena, zapaža se da pomenute razlike nisu statistički značajne samo na obrtajima od 2000 i 2500. Sve ostale razlike između grupa su značajne, kao što se vidi u tabeli 5.8 i na slici 5.11.

Tabela 5.8. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor **Broj obrtaja motora**

Komponente	n (o/min)	n (o/min)	M	SE	p
Benzen	2000	2500	-1,416	0,839	0,419
		3000	-1,631	0,766	0,215
		3500	-1,366	0,766	0,369
	2500	2000	1,416	0,839	0,419
		3000	-0,215	0,766	0,994
		3500	0,049	0,766	1,000
	3000	2000	1,631	0,766	0,215
		2500	0,215	0,766	0,994
		3500	0,265	0,685	0,985
	3500	2000	1,366	0,766	0,369
		2500	-0,049	0,766	1,000
		3000	-0,265	0,685	0,985
Toluen	2000	2500	1,450	0,891	0,453
		3000	5,640	0,813	0,000
		3500	5,024	0,813	0,000
	2500	2000	-1,450	0,891	0,453
		3000	4,190	0,813	0,000
		3500	3,574	0,813	0,000
	3000	2000	-5,640	0,813	0,000
		2500	-4,190	0,813	0,000
		3500	-6,15	0,727	0,869
	3500	2000	-5,024	0,813	0,000
		2500	-3,574	0,813	0,000
		3000	,615	0,727	0,869
Etilbenzen	2000	2500	1,061	0,318	0,014
		3000	1,875	0,290	0,000
		3500	2,579	0,290	0,000
	2500	2000	-1,061	0,318	0,014
		3000	,813	0,290	0,054
		3500	1,517	0,290	0,000
	3000	2000	-1,875	0,290	0,000
		2500	-,813	0,290	0,054
		3500	,703	0,259	0,067
	3500	2000	-2,579	0,290	0,000
		2500	-1,517	0,290	0,000
		3000	-0,703	0,259	0,067
m,p-ksilen	2000	2500	4,087	0,777	0,000
		3000	8,326	0,709	0,000
		3500	10,302	0,709	0,000
	2500	2000	-4,087	0,777	0,000
		3000	4,239	0,709	0,000
		3500	6,215	0,709	0,000
	3000	2000	-8,326	0,709	0,000
		2500	-4,239	0,709	0,000
		3500	1,975	0,634	0,025
	3500	2000	-10,302	0,709	0,000
		2500	-6,215	0,709	0,000
		3000	-1,975	0,634	0,025
o-ksilen	2000	2500	0,823	0,367	0,177
		3000	2,124	0,335	0,000
		3500	3,148	0,335	0,000
	2500	2000	-0,823	0,367	0,177
		3000	1,301	0,335	0,003
		3500	2,325	0,335	0,000
	3000	2000	-2,124	0,335	0,000
		2500	-1,301	0,335	0,003
		3500	1,024	0,300	0,011
	3500	2000	-3,148	0,335	0,000
		2500	-2,325	0,335	0,000
		3000	-1,024	0,300	0,011



Slika 5.11. Koncentracije BTEX jedinjenja u funkciji broja obrtaja motora.

5.3.1.3. Koeficijent viška vazduha- λ

Analizirajući razlike u koncentracijama komponenti u odnosu na faktor koeficijenta viška vazduha, evidentirano je da se koncentracije statistički značajno razlikuju u sva tri nivoa faktora, za svih pet posmatranih komponenti. Rezultati post-hoc analiza za faktor koeficijent viška vazduha prikazani su u tabeli 5.9.

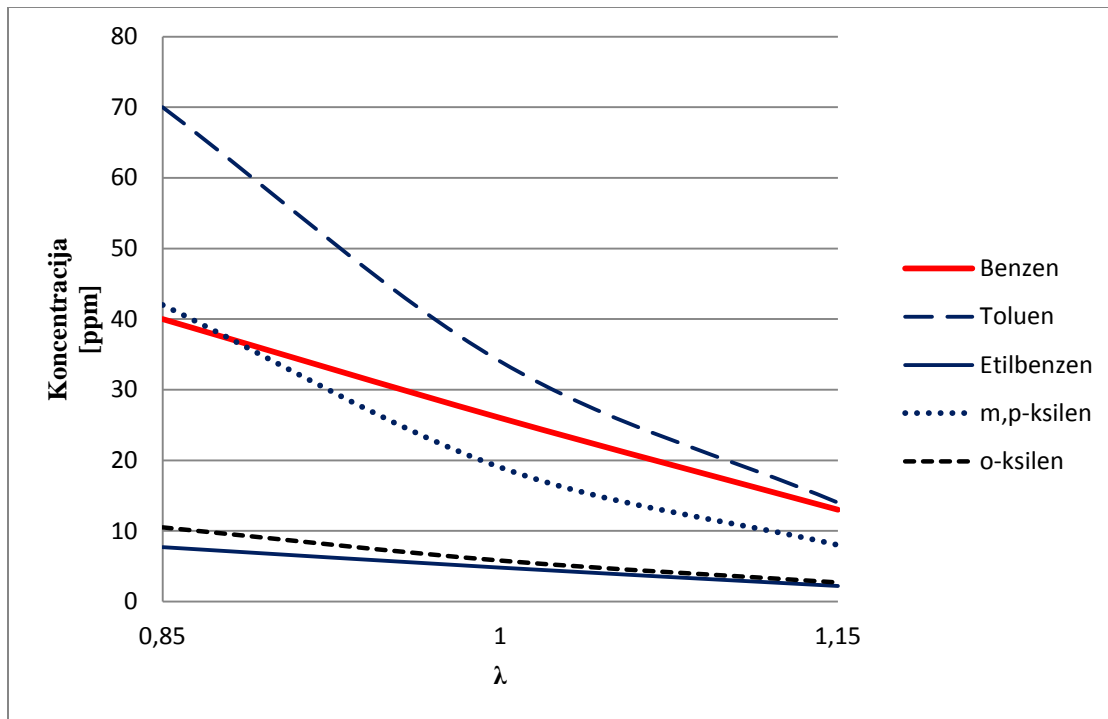
Opadajući trend koncentracionih nivoa sa povećanjem koeficijenta viška vazduha prate sve komponente iz grupe BTEX, kao što je bio slučaj i kod Europremium benzina. Najviše koncentracije BTEX jedinjenja detektovane su u zoni bogate smeše gorivo/vazduh gde usled nedostatka vazduha dolazi do nepotpunog sagorevanja gorive smeše, što rezultuje visokim koncentracionim nivoima BTEX jedinjenja. Višak vazduha obezbeđuje povoljnije uslove za sagorevanje (Colls, 2002; Barth i dr., 2000; Flagan i Seinfeld, 1988), usled čega dolazi do sniženja koncentracionih nivoa svih BTEX jedinjenja u smeši izduvnih gasova.

Tabela 5.9. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor **Koeficijent viška vazduha**

Komponenta	Opterećenje	Opterećenje	M	SE	p
Benzen	0,85	1	13,638	0,650	0,000
		1,15	28,112	0,650	0,000
	1	0,85	-13,638	0,650	0,000
		1,15	14,474	0,650	0,000
	1,15	0,85	-28,112	0,650	0,000
		1	-14,474	0,650	0,000
Toluen	0,85	1	37,912	0,690	0,000
		1,15	58,533	0,690	0,000
	1	0,85	-37,912	0,690	0,000
		1,15	20,621	0,690	0,000
	1,15	0,85	-58,533	0,690	0,000
		1	-20,621	0,690	0,000
Etilbenzen	0,85	1	2,996	0,246	0,000
		1,15	5,455	0,246	0,000
	1	0,85	-2,996	0,246	0,000
		1,15	2,459	0,246	0,000
	1,15	0,85	-5,455	0,246	0,000
		1	-2,459	0,246	0,000
m,p-ksilen	0,85	1	22,670	0,602	0,000
		1,15	34,182	0,602	0,000
	1	0,85	-22,670	0,602	0,000
		1,15	11,512	0,602	0,000
	1,15	0,85	-34,182	0,602	0,000
		1	-11,512	0,602	0,000
o-ksilen	0,85	1	4,832	0,284	0,000
		1,15	8,193	0,284	0,000
	1	0,85	-4,832	0,284	0,000
		1,15	3,361	0,284	0,000
	1,15	0,85	-8,193	0,284	0,000
		1	-3,361	0,284	0,000

Mogućnost porasta koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja postoji i u zoni siromašne smeše prilikom nekontrolisanog povećanja vrednosti λ -faktora. Razlog za povećani udeo BTEX jedinjenja u siromašnoj smeši je ranije gašenje gorive smeše u cilindrima, usled čega ne sagoreva celokupna pristigla masa goriva (Zervas i dr., 2004).

Grafički prikaz statistički značajnih razlika u koncentracijama komponenti za različite vrednosti koeficijenta viška vazduha, predstavljen je na slici 5.12.

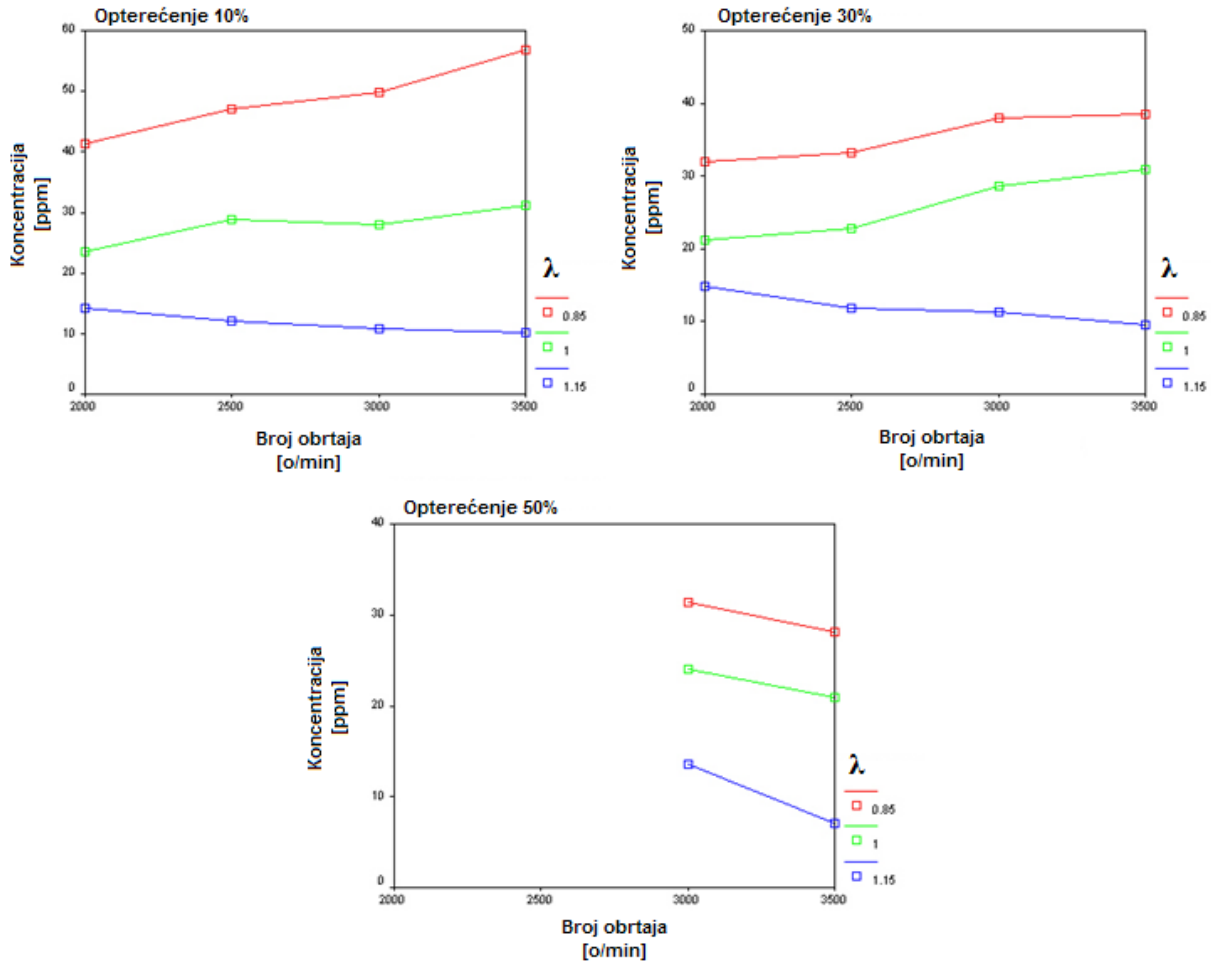


Slika 5.12. Koncentracije BTEX jedinjenja u funkciji koeficijenta viška vazduha

5.3.2. Efekti interakcije drugog i trećeg reda

Veoma su značajni efekti interakcije drugog i trećeg reda između posmatranih faktora. Za svaku komponentu iz BTEX grupe efekti zajedničkog uticaja svih posmatranih faktora prikazani su grafički na slikama od 5.13 do 5.17.

Slika 5.13 prikazuje uticaj zajedničkog delovanja svih posmatranih faktora eksperimentalnog motora na koncentracione nivoe benzena.

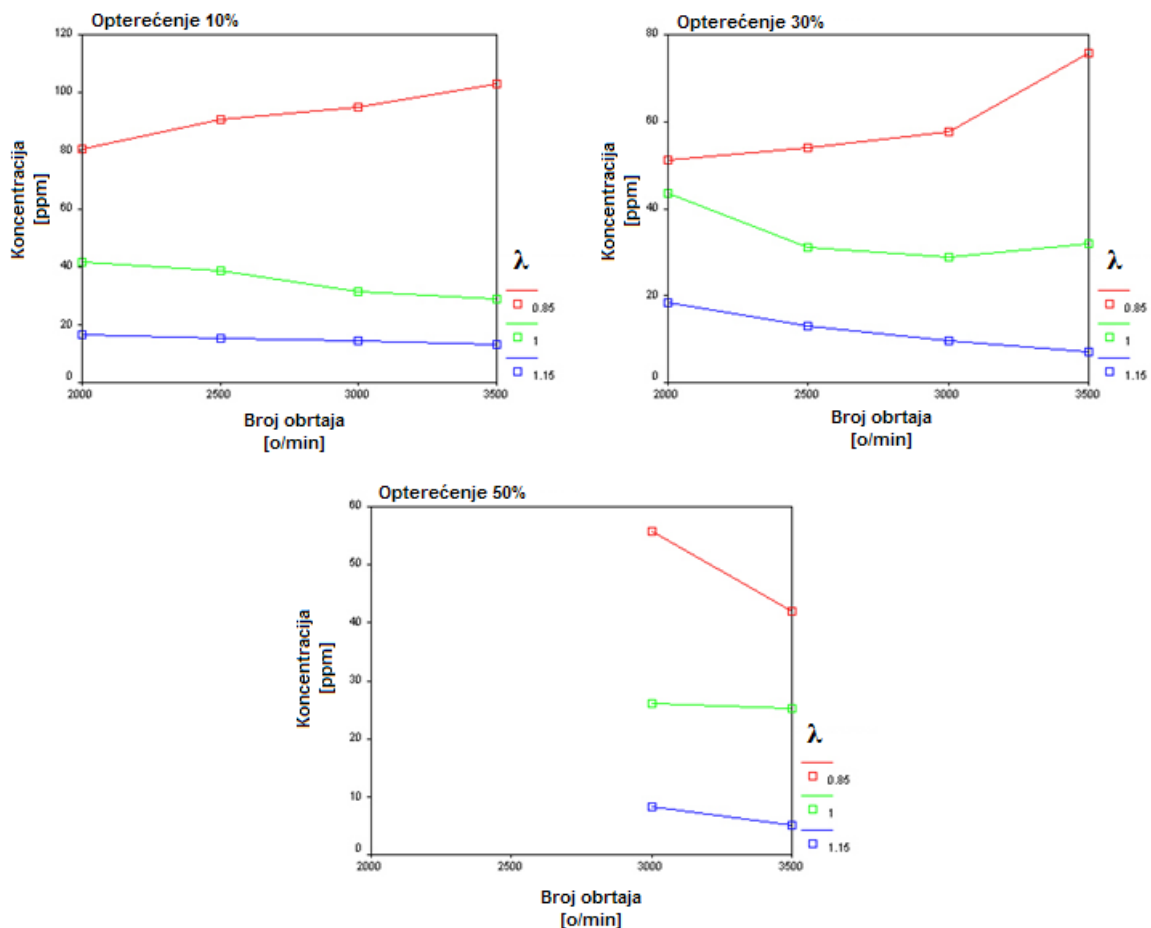


Slika 5.13. Koncentracija benzena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Pri opterećenjima od 10%, 30% i 50% koncentracija benzena u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha i broja obrtaja motora se menja na različite načine. U uslovima nižih (10%) i srednjih opterećenja (30%) motora u uslovima bogate ($\lambda=0,85$) i stehiometrijske smeše ($\lambda=1$), koncentracija benzena se nelinearno povećava sa povećanjem broja obrtaja. Dok se u uslovima koji odgovaraju visokom stepenu opterećenja (50%) i obezbeđenog viška vazduha ($\lambda=1,15$), koncentracioni nivoi benzena se smanjuju sa povećanjem broja obrtaja eksperimentalnog motora. U uslovima bogate smeše nedovoljna količina vazduha koja je na raspolaganju utiče na nepotpuno sagorevanje smeše gorivo/vazduh, a samim tim i na visoke koncentracione nivoe benzena detektovane u izduvnim gasovima eksperimentalnog motora. Pojava visokih

koncentracija benzena u izduvnim gasovima u uslovima stehiometrijske smeše i niskih i srednjih opterećenja, može se kao i u slučaju benzina Europremium, pripisati stvaranju povoljnih uslova za dealkilaciju viših aromata i njihovo prevođenje u benzen kao krajnji produkt procesa dealkilacije (Kaiser i dr., 1991; Schuetzle i dr., 1994; Hasan i dr., 2011). Kada je vrednost koeficijenta viška vazduha $\lambda=1,15$, koncentracija benzena opada sa povećanjem broja obrtaja motora, nezavisno od stepena opterećenja, jer usled viška vazduha dolazi do stvaranja uslova koji odgovaraju potpunijem sagorevanju bez obzira na ostale radne parametre eksperimentalnog motora.

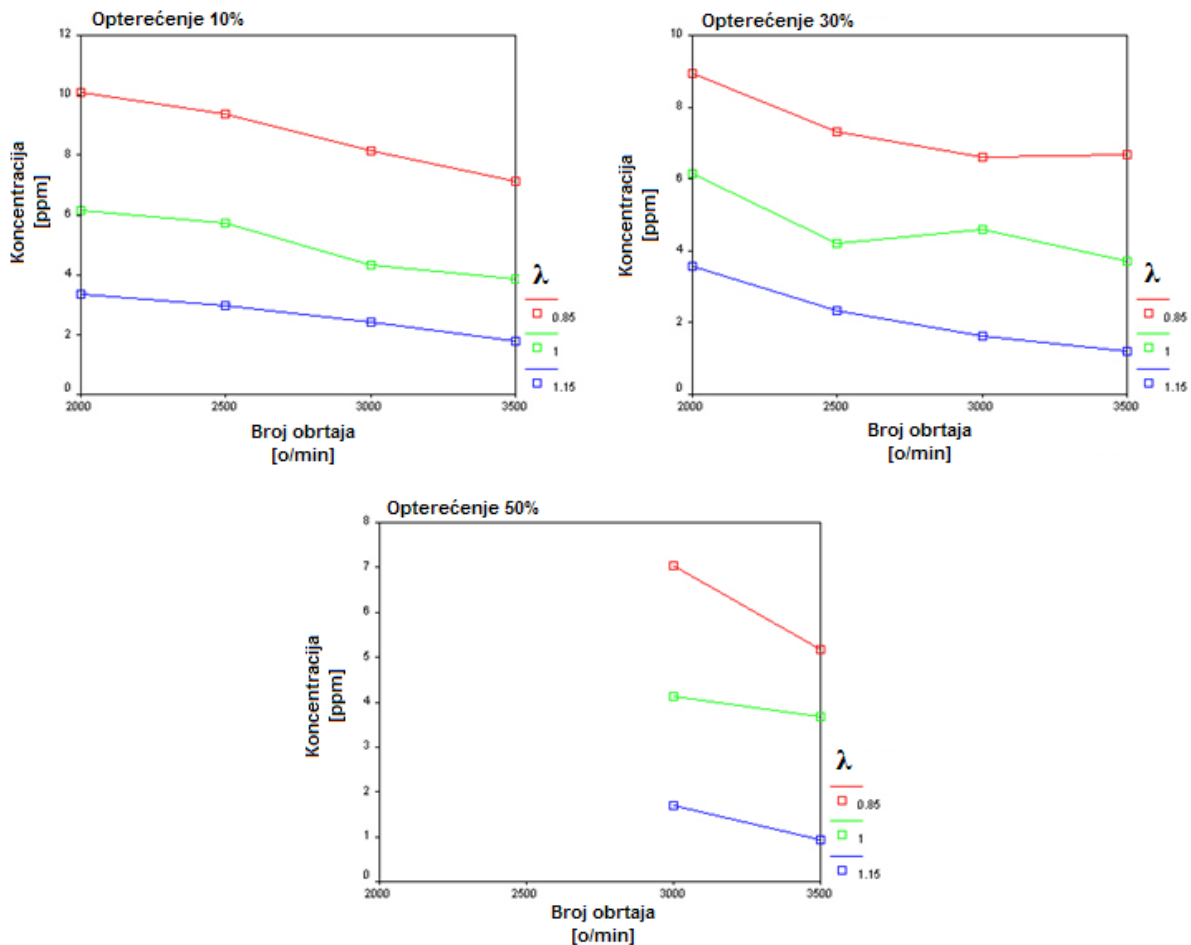
Slika 5.14 prikazuje efekte interakcije radnih parametara eksperimentalnog motora na koncentracione nivoe toluena.



Slika 5.14. Koncentracija toluena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Posmatrajući efekte radnih parametara na koncentracione nivoe toluena može se uočiti opadajući trend koncentracionih nivoa sa povećanjem broja obrtaja u uslovima stehiometrijske ($\lambda=1$) i siromašne smeše ($\lambda=1,15$) gorivo/vazduh kao rezultat potpunijeg sagorevanja gorive smeše. Izvedeni zaključak podržava i sniženje koncentracionih nivoa toluena sa povećanjem opterećenja eksperimentalnog motora. Rastući trend koncentracionih nivoa toluena sa povećanjem broja obrtaja eksperimentalnog motora zabeležen je samo u uslovima bogate smeše gorivo/vazduh ($\lambda=0,85$), pri čemu se povišeni koncentracioni nivoi toluena u izduvnim gasovima eksperimentalnog motora javljaju pre svega kao rezultat nepotpunog sagorevanja bogate smeše. Najviša prosečna koncentracija toluena (103 ppm) detektovana je u uslovima bogate smeše ($\lambda=0,85$), niskog nivoa opterećenja (10%) i velikog broja obrtaja (3500 o/min), dok je najniža prosečna vrednost (5,186 ppm) detektovana u uslovima siromašne smeše ($\lambda=1,15$), visokog nivoa opterećenja (50%) i velikom broju obrtaja (3500 o/min). Sniženje koncentracije od 95%, u odnosu na početne uslove, ukazuje na mogućnost kontrole koncentracionih nivoa toluena podešavanjem odgovarajućih radnih parametara motora. U realnim sistemima nije moguće ostvariti toliko visok stepen redukcije koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja, zbog optimizacije svih ostalih parametara vozivosti putničkog automobila, ali ukazuje na mogućnost kontrole emisije kroz odgovarajuću optimizaciju emisionih i radnih karakteristika motora.

Uticaj promene radnih parametara eksperimentalnog motora na koncentracione nivoe etilbenzena prikazan je na slici 5.15.

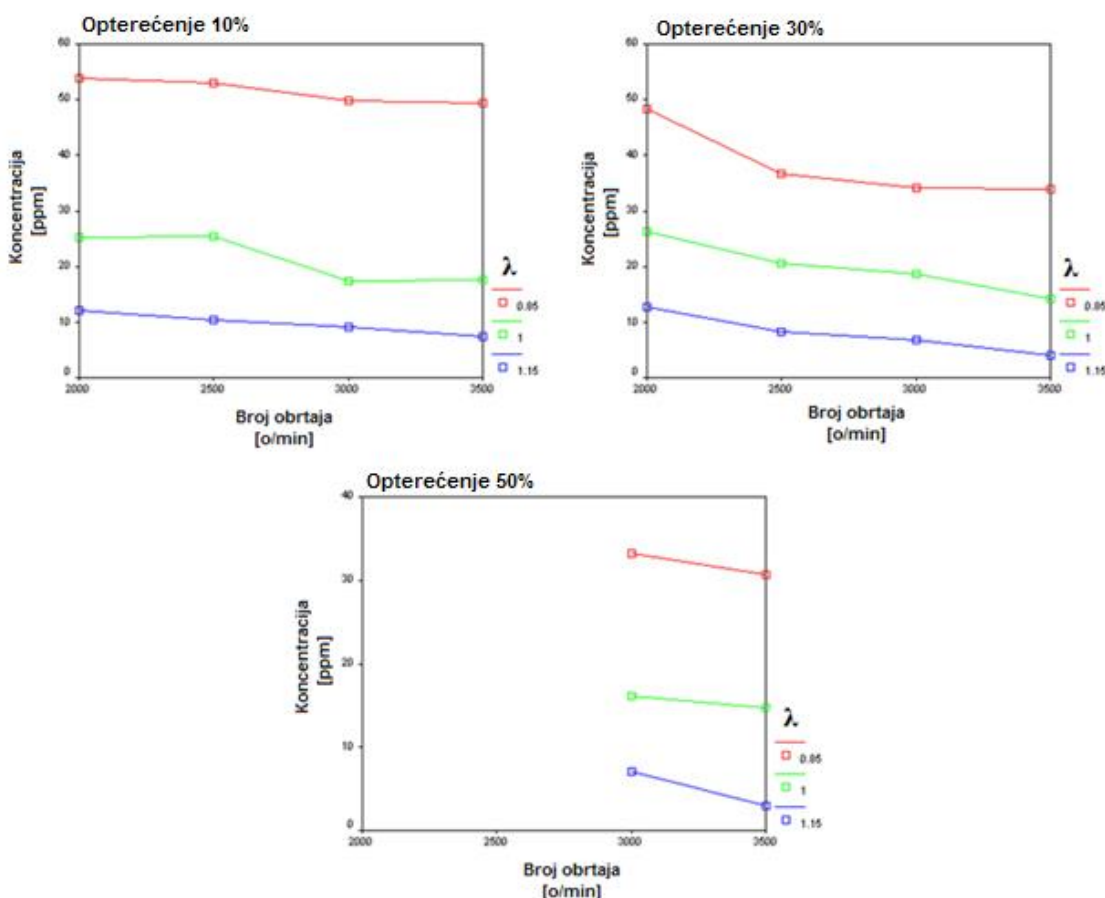


Slika 5.15. Koncentracija etilbenzena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Analizom grafika zavisnosti koncentracije etilbenzena od radnih parametara eksperimentalnog motora, prikazanog na slici 5.15, može se uočiti opadajući trend koncentracionih nivoa koji prati povećanje vrednosti svih ispitivanih radnih parametara. Najviša prosečna koncentracija etilbenzena (10,1 ppm) detektovana je u uslovima niskog nivoa opterećenja eksperimentalnog motora (10%) u uslovima bogate smeše gorivo/vazduh ($\lambda=0,85$) i najnižem ispitivanom broju obrta (2000 o/min). Obezbeđivanjem povoljnijih uslova sagorevanja, pre svega povećanjem vrednosti koeficijenta viška vazduha, povećanjem stepena opterećenja i broja obrtaja eksperimentalnog motora omogućava se pad koncentracionih nivoa etilbenzena, tako da je najniža prosečna vrednost koncentracije etilbenzena (0,927 ppm) detektovana pri stepenu

opterećenja eksperimentalnog motora od 50%, broju obrtaja od 3500 o/min u uslovima siromašne smeše gorivo/vazduh ($\lambda=1,15$).

Zavisnost koncentracionih nivoa m,p-ksilena od radnih parametara eksperimentalnog motora prikazana je na slici 5.16.

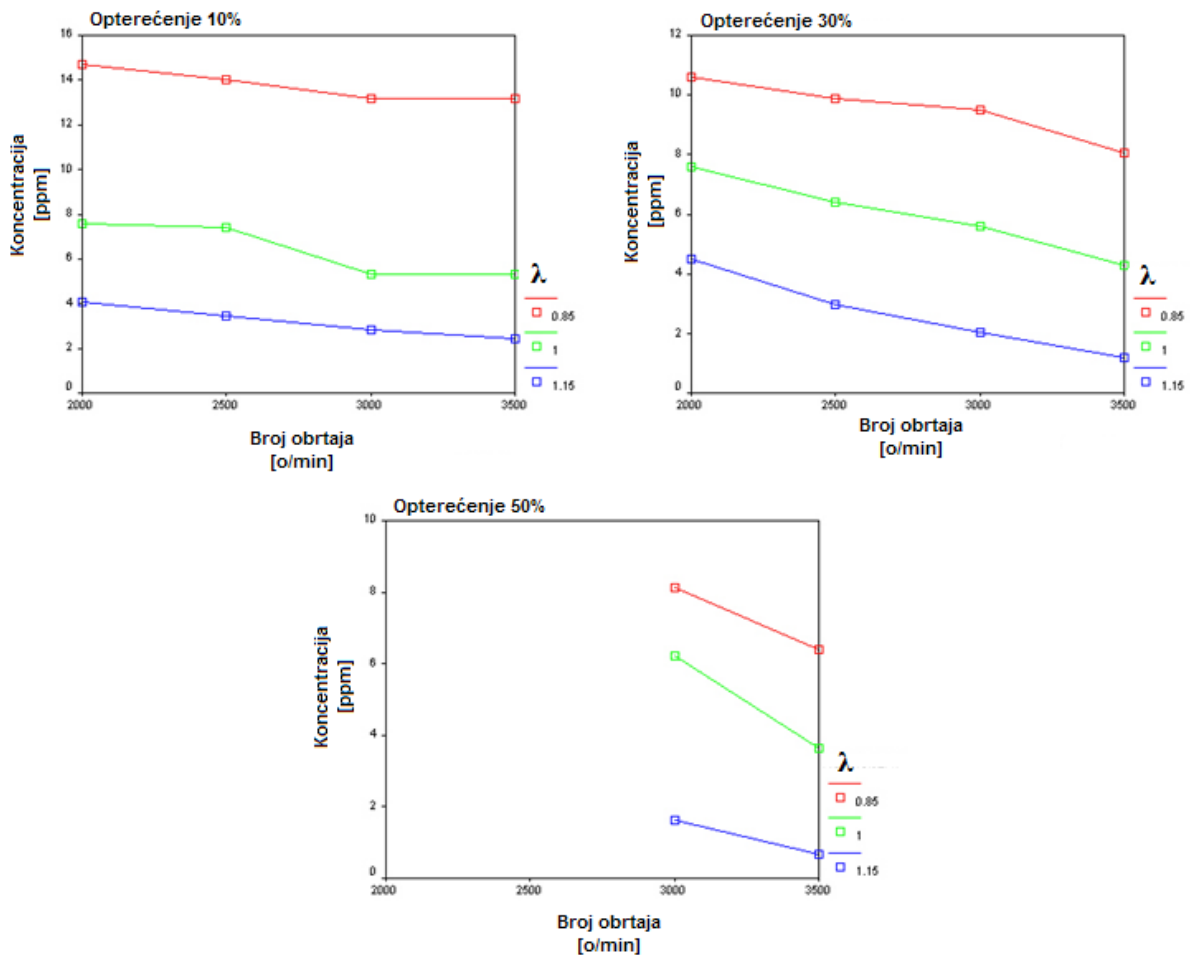


Slika 5.16. Koncentracija m,p-ksilena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Opadajući trend koncentracionih nivoa sa povećanjem vrednosti svih radnih parametara eksperimentalnog motora prati i m,p-ksilen. Najviša prosečna koncentracija m,p-ksilena (53,8 ppm) detektovana je u uslovima bogate smeše gorivo/vazduh, pri niskom stepenu opterećenja (10%) i malom broju obrtaja (2000 o/min) eksperimentalnog motora. Povećanje udela vazduha u napojnoj smeši, kao dominantnog faktora efikasnosti procesa sagorevanja, povećanje opterećenja

i broja obrtaja eksperimentalnog motora povoljno utiče na sniženje koncentracionih nivoa m,p-ksilena u smeši izduvnih gasova. Najniža prosečna koncentracija m,p-ksilena (2,947 ppm) detektovana je u uslovima siromašne smeše ($\lambda=1,15$), visokog stepena opterećenja (50%) i broja obrtaja (3500 o/min).

Na slici 5.17 može se pratiti promena koncentracionih nivoa o-ksilena u zavisnosti od radnih parametara eksperimentalnog motora.



Slika 5.17. Koncentracija komponente o-ksilena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Poput m,p-ksilena sličan trend opadajućih vrednosti koncentracionih nivoa sa povećanjem vrednosti radnih parametara eksperimentalnog motora prati i o-ksilen. Najviša prosečna koncentracija o-ksilena detektovana u uslovima bogate smeše ($\lambda=0,85$), niskog stepena opterećenja (10%) i broja obrtaja (2000 o/min) iznosila je 14,7 ppm. Povećanje vrednosti koeficijenta viška vazduha ($\lambda=1,15$), stepena opterećenja (50%) i broja obrtaja eksperimentalnog motora (3500 o/min) pogodovalo je opadanju vrednosti koncentracije o-ksilena tako da je najniža detektovana vrednost u navedenim uslovima iznosila 0,687 ppm.

5.4. Korelacija koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja

Radi utvrđivanja povezanosti između zavisnih varijabli, odnosno koncentracija posmatranih komponenti, izračunati su Pirsonovi koeficijenti korelacije koji su prikazani u tabeli 5.10 za gorivo Europremium i tabeli 5.11 za gorivo NIS-a.

Tabela 5.10. Koeficijenti korelacije (r) između merenih osobina na primeru goriva Europremium

	Benzen	Toluen	Etilbenzen	m,p-ksilen	o-ksilen
Benzen	1				
Toluen	0,886**	1			
Etilbenzen	0,649**	0,808**	1		
m,p-ksilen	0,642**	0,795**	0,906**	1	
o-ksilen	0,704**	0,853**	0,884**	0,881**	1

** $p < 0,01$

Sve komponente BTEX grupe u slučaju Europremium benzina su pozitivno i značajno povezane. Pozitivne korelacije ukazuju na činjenicu da sa porastom koncentracije jedne, raste i koncentracija druge komponente. Najveća korelacija detektovana je između etilbenzena i m,p-ksilena i iznosi $r = 0,906$, $p < 0,01$, a najmanja, mada ne mala, između benzena i m,p-ksilena, $r = 0,642$, $p < 0,01$.

Tabela 5.11. Koeficijenti korelacije (r) između merenih osobina na primeru goriva NIS-a

	Benzen	Toluen	Etilbenzen	m,p-ksilen	o-ksilen
Benzen	1				
Toluen	0,920**	1			
Etilbenzen	0,789**	0,816**	1		
m,p-ksilen	0,871**	0,993**	0,885**	1	
o-ksilen	0,853**	0,899**	0,855**	0,924**	1

** $p < 0,01$

U tabeli 5.11 prikazana je korelacija BTEX komponenti u slučaju NIS- benzina. Sve komponente su pozitivno i značajno povezane, kao i u slučaju Europremium benzina. Najveća korelacija detektovana je između toluena i m,p-ksilena, $r = 0,993$, $p < 0,01$, dok je najmanja povezanost zabeležena između benzena i etilbenzena, $r = 0,789$, $p < 0,01$.

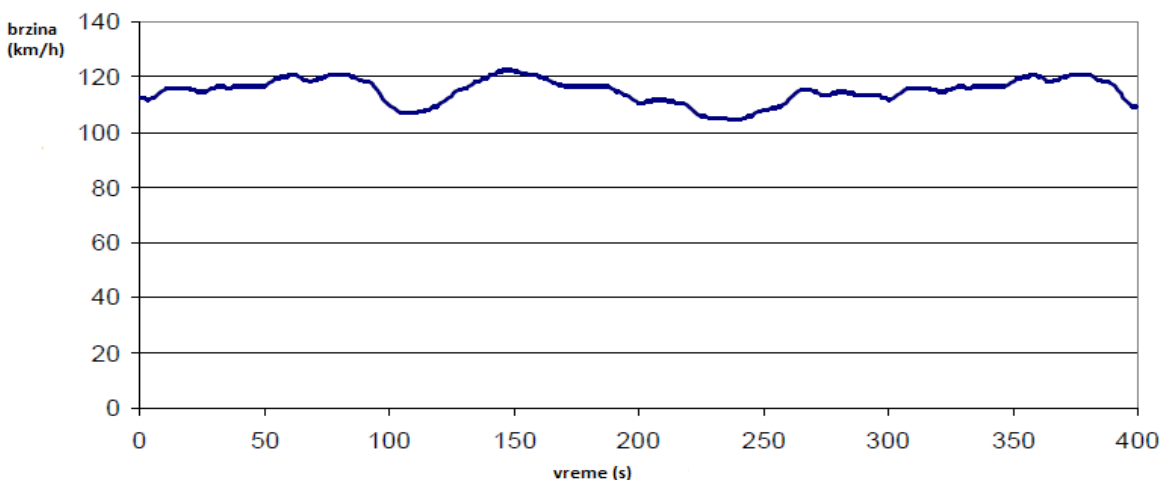
6. MODEL EMISIJE BTEX JEDINJENJA

6.1. Ciklusi vožnje

Vozni ciklus predstavlja unapred određeni redosled operacija, koji omogućava ponovljivost emisionih testova. Ciklusi vožnje su najčešće definisani brzinom i stepenom opterećenja u funkciji od vremena. Nivoi simulacije zavise od velikog broja parametara, koji uključuju: model vozila, veličinu, tip pogonskog goriva, tehnološki nivo, pređene kilometre i operativne faktore kao što su brzina, ubrzanje i stepen opterećenja. Karakteristični ciklusi vožnje su razvijeni za različite tipove motornih vozila: putničke automobile, kombi vozila, kamione, autobuse, motocikle i druga motorna vozila. Osim emisionih karakteristika mogu se pratiti i ostale performanse motora tokom voznog ciklusa (Barlow i dr., 2009).

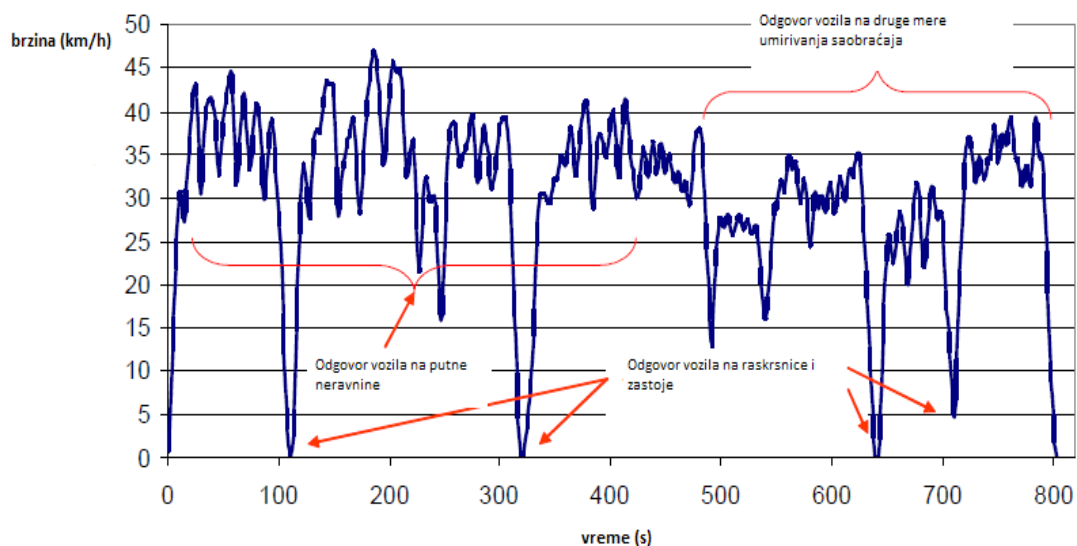
Prilikom opisivanja kretanja vozila koriste se odgovarajući standardi, kako bi se na najbolji mogući način simulirala vožnja koja se najčešće javlja prilikom eksploatacije putničkih vozila. Izmerene vrednosti tokom ciklusa u velikoj meri registruju uticaj vozila na životnu sredinu i prirodne resurse. Na osnovu dobijenih rezultata u dovoljno tačnoj meri mogu se komparirati, projektovati i predviđati dugoročni uticaji vozila u domenu važnih parametara uticaja na životnu sredinu kao što su emisija toksičnih jedinjenja, buka, potrošnja i drugo.

U zavisnosti od brzinskih karakteristika i promene stepena opterećenja, ciklusi vožnje generalno mogu biti podeljeni na stabilne i tranzijentne. Stabilni ciklusi se koriste za testiranje teških vozila i dizel motora i karakterišu se konstantnom brzinom i stepenom opterećenja. Primer stabilnog voznog ciklusa prikazan je na slici 6.1.



Slika 6.1. Primer pseudo-stabilnog EMPA T115 ciklusa (Barlow i dr., 2009).

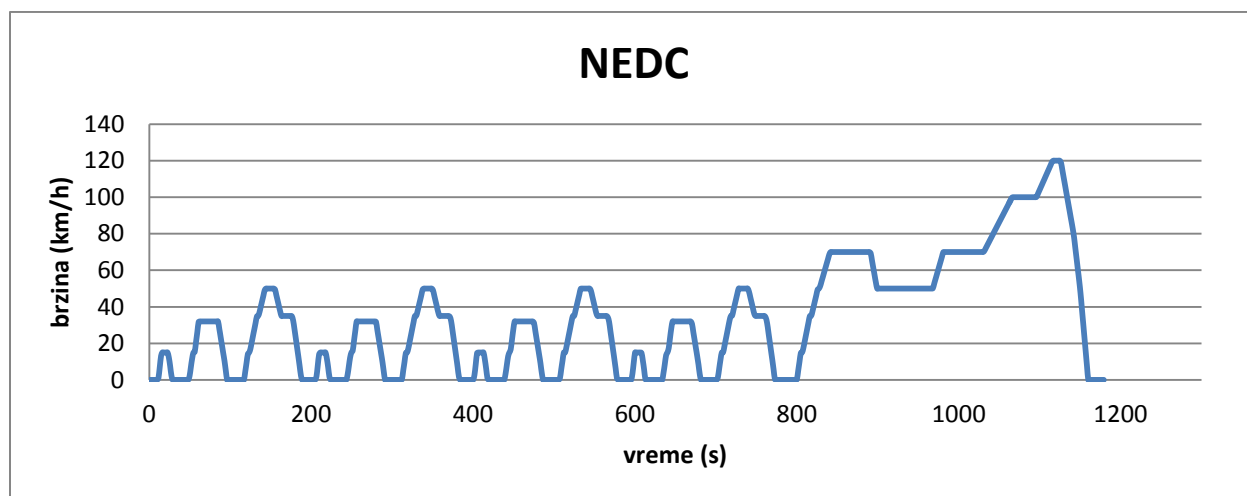
Tranzijentni ciklusi se karakterišu promenljivim brzinskim karakteristikama i promenljivim stepenom opterećenja. Primer tranzijentnog ciklusa vožnje prikazan je na slici 6.2.



Slika 6.2. Primer realnog ciklusa gradske vožnje TRAMAQ UG 214 (Barlow i dr., 2009).

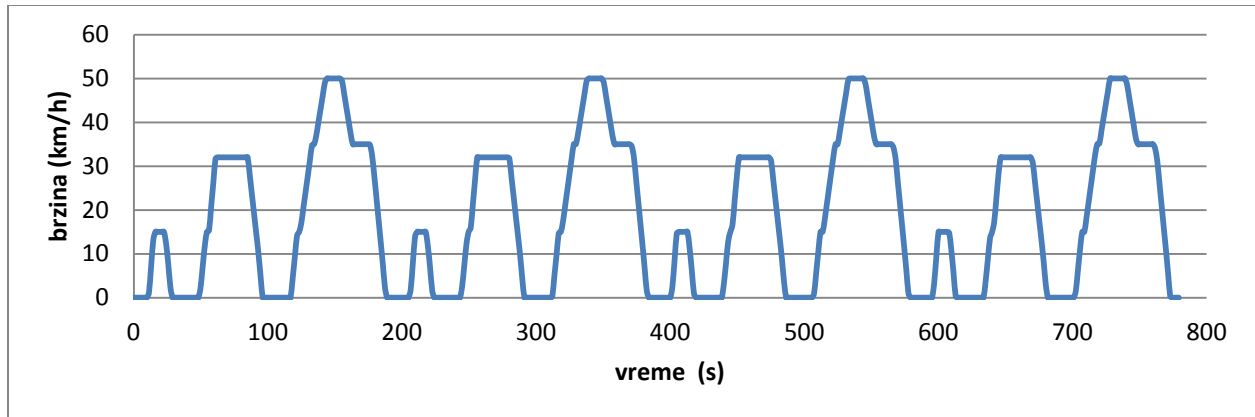
6.1.1. Novi Evropski Ciklus Vožnje- NEDC

Za potrebe odgovarajućih emisionih testova, kao i testova potrošnje specijalno je dizajniran takozvani Novi Evropski Ciklus Vožnje (New European Driving Cycle-NEDC), kako bi na odgovarajući način reprezentovao standarde uslove vožnje u evropskim gradovima. U državama EU koristi se za testiranje lakih motornih vozila. NEDC, prikazan na slici 6.3, predstavlja teorijski ciklus sa periodima ubrzavanja, usporavanja kao i periodima konstantne brzine, nastao sumiranjem i usrednjavanjem pojedinačnih slučajeva realne gradske vožnje. Ciklus se sastoji od dva glavna dela. Prvi deo simulira vožnju motornog vozila u urbanim sredinama, dok drugi deo ciklusa predstavlja vožnju na otvorenom putu (Pacheco i dr., 2013).



Slika 6.3. Novi evropski ciklus vožnje

Urbani ciklus vožnje- UDC (Urban Driving Cycle), poznat i kao ECER15 uveden je 1970 kao deo propisa Evropske ekonomske komisije Ujedinjenih nacija UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*). Novije verzije su definisane kao ECE R83, R84 i R101. UDC se karakteriše malim opterećenjem motora, nižim temperaturama izduvnih gasova i maksimalnom brzinom do 50 km/h. Urbani deo ciklusa NEDC, prikazan je na slici 6.4.



Slika 6.4. Urbani deo NEDC

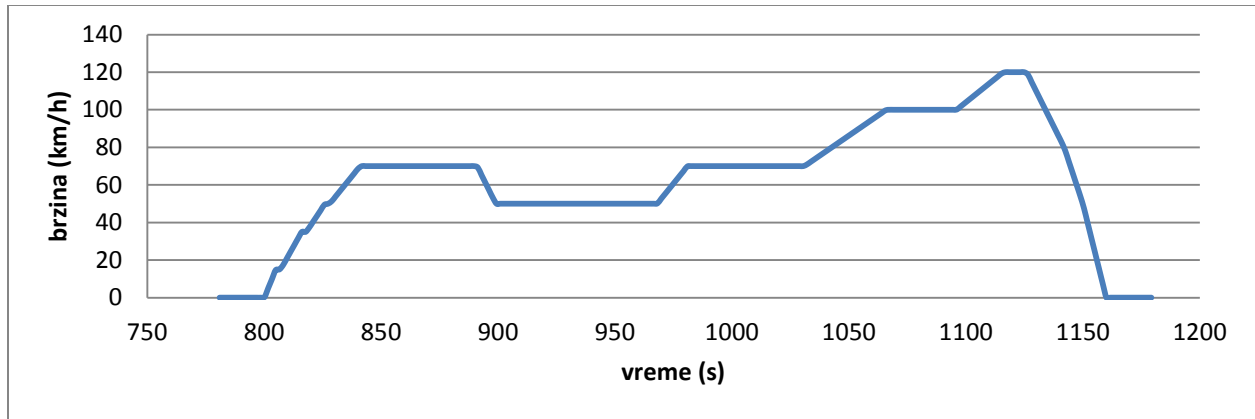
U urbanom delu ciklusa vožnje, prikazanom na grafiku 35, automobil se nakon paljenja nalazi u stanju mirovanja prvih 11 s, a potom ubrzava do 15 km/h za 4 s. Sledi period u kom se vozilo kreće konstantnom brzinom narednih 8 s, zatim usporava do potpunog zaustavljanja za 5s. Vozilo se nakon zaustavljanja nalazi u stanju mirovanja u trajanju od 21s.

U 49-toj sekundi automobil ubrzava do 32 km/h za 12 s, zatim se kreće konstantnom brzinom u periodu od 24s. Sledi period usporavanja vozila do konačnog zaustavljanja u periodu od 11s, da bi se nalazilo u periodu mirovanja u narednih 21s.

U 117-toj sekundi vozilo ubrzava do 50 km/h za 26 s. Potom se kreće konstantnom brzinom u periodu od 12s. Sledi usporavanje vozila do 35 km/h za 8s i kretanje konstantnom brzinom u narednih 13s, nakon čega sledi zaustavni period od 12s. Pre početka novog ciklusa sledi pauza u trajanju od 7s. Ciklus se završava nakon 195s i pređenog teoretskog rastojanja od 1017 m.

Urbani ciklus vožnje se sastoji od četiri uzastopno ponovljena gore pomenuta ciklusa. Ukupno trajanje čitavog ciklusa urbane vožnje je 780s sa teoretski pređenim rastojanjem od 4067 m i prosečnom brzinom od 18,77 km/h

Vangradski ciklus vožnje EUDC (Extra Urban Driving Cycle) uveden je 1990 i dizajniran je tako da reprezentuje uslove agresivnije vožnje sa režimima brze vožnje. Maksimalna brzina ovog dela ciklusa je 120 km/h. Vangradski deo ciklusa vožnje prikazan je na slici 6.5.



Slika 6.5. Vangradski deo ciklusa vožnje NEDC

Nakon urbanog dela ciklusa sledi 20s zaustavnog perioda. Vozilo potom ravnomerno ubrzava do 70 km/h za 41s, nakon čega sledi period stabilne vožnje u trajanju od 50s, zatim usporavanje do 50 km/h za 8s i stabilna vožnja u periodu od 69s. Po završetku perioda u kom se vozilo kreće konstantnom brzinom sledi ubrzanje do 70 km/h za 13s.

U 980-joj sekundi od početka ciklusa automobil se kreće brzinom od 70 km/h u trajanju od 50s, a potom ubrzava do 100 km/h u periodu od 35s i kreće se stalnom brzinom u narednih 30s.

Konačno u 1096-joj sekundi automobil ubrzava do 120 km/h za 20s, istom brzinom kreće se narednih 10s, a potom usporava do konačnog zaustavljanja u periodu od 34 s. Narednih 20s automobil se nalazi u stanju mirovanja.

Ukupna dužina trajanja ciklusa je 400s sa teoretski pređenim rastojanjem od 6956 metara i prosečnom brzinom od 62,6 km/h.

Na slici 6.2 prikazan je primer realnog voznog ciklusa dobijenog na osnovu pojedinačnog slučaja vožnje u gradskim uslovima. Postoji razlika između realnih ciklusa i standardom definisanog ciklusa. Realni ciklusi su promenljivi u znatno većoj meri u odnosu na normalizovane cikluse, kao što je to NEDC, koji su nastali sumiranjem i usrednjavanjem pojedinačnih slučajeva reprezentovanih u vidu stilizovanih ciklusa i karakterišu se znatno većim intervalima stabilnih brzinskih karakteristika.

6.1.2. Važnost ciklusa vožnje u modelovanju emisije

Prilikom definisanja i razvoja, modeli emisije uzimaju u obzir različite faktore koji utiču na emisiju. Jedan od osnovnih pristupa se zasniva na fenomenu da se prosečan emisioni faktor za određeni polutant i dati tip vozila menja u zavisnosti od prosečne brzine tokom puta. Emisioni faktor određenog polutanta je obično izražen u gramima po kilometru (g/km). Kontinualna emisiona funkcija prosečne brzine je usaglašena sa emisionim faktorima merenim za grupu vozila u opsegu ciklusa vožnje, gde svaki ciklus predstavlja specifičan način vožnje. Emisione funkcije prosečne brzine za drumska vozila su široko primenjene u regionalnim i nacionalnim propisima i koriste se u kombinaciji sa lokalnim modelima za predviđanje aerozagađenja. Pomenuti pristup je primenjen u NAEI i COPERT III modelu (Papić i dr., 2010). Postoje brojna ograničenja povezana sa modelima koji se zasnivaju na prosečnoj brzini. Jedno od ograničenja predstavlja nemogućnost uzimanja u obzir različitog ponašanja i emisionih karakteristika tokom vožnje. To se prvenstveno odnosi na moderne benzinske motore opremljene katalizatorom kod kojih se najveći deo emisije dešava u veoma kratkim intervalima, prilikom promene opterećenja i u periodima snažnih akceleracija.

Jedna alternativa modelovanju na osnovu prosečne brzine jeste pristup koji povezuje određene emisione faktore sa specifičnim situacijama u saobraćaju. Emisioni faktori se dobijaju korišćenjem ciklusa vožnje, što ukazuje na jasnu potrebu da ciklus vožnje bude reprezentativan za situaciju u saobraćaju koju predstavlja (Barth i dr., 2000).

U skladu sa promenama u modelima na bazi prosečne brzine i odgovarajućih modela baziranih na konkretnim situacijama u saobraćaju, koncept takozvane "dinamike ciklusa" postao je veoma koristan za razvijanje modela. U kvalitativnom smislu dinamika ciklusa može biti posmatrana kao "agresivnost" vožnje ili kao stepen prolaznih operacija tokom vožnje. Kvantitativno termin se odnosi na varijacije različitih veličina ili statističkih deskriptora odgovarajućih operacionih karakteristika vozila. Razmatra se širok opseg promenljivih u pokušaju da se razume veza između dinamike ciklusa i emisije. Međutim usled ograničenosti podataka o funkcionisanju vozila i činjenice da su najvećim delom zasnovani na brzinama, fokus prilikom razvijanja modela je neminovno usmeren ka parametrima koji opisuju promenu brzine.

6.2. Modalna emisija

Prepoznajući nedostatke emisionih modela na bazi prosečne brzine sadašnji pokušaji modelovanja uključuju modove ubrzanja, usporenja, mirovanja i periode stabilne vožnje. US EPA sprovela je preliminarna testiranja modalne emisije. Eksperimenti, sprovedeni od strane EPA, su primarno fokusirani na periode akceleracije (Barth i dr., 2000). Kao pogodan metod za karakterizaciju različitih operativnih modova koji obuhvataju prethodno pomenuto: mirovanje, stabilnu vožnju, kao i periode akceleracije i deceleracije predloženo je formiranje odgovarajućih matrica brzina/ubrzanje. Sa takvom postavkom matrica moguće je meriti odnosno kvantifikovati emisije koje su u vezi sa različitim modovima. Emisiona matrica bi omogućila multipliciranje u okviru stilizovanih ciklusa, kakav je NEDC. Aktivnost vozila može biti podeljena tako da svaki deo reprezentuje određeno vreme provedeno u odgovarajućem modu. Rezultat bi bila ukupna količina emisije produkovana tokom specifičnih aktivnosti povezanih sa emisionom matricom. Drugi metod je razvijanje emisione mape zasnovane na vezi snage motora i brzine, pri čemu je neophodno izvršiti testiranje emisionih karakteristika vozila u karakterističnim radnim tačkama.

6.3. Razvoj modela emisije BTEX jedinjenja

Osnovna svrha modela razvijenog u okviru doktorske disertacije je da se predvidi emisija BTEX jedinjenja na izduvu i poveže sa različitim operacijama tokom voznog ciklusa, kao što su mirovanje, stabilna vožnja, ubrzavanje i usporavanje. Pomenuta stanja mogu biti veoma kratka, u trajanju od nekoliko sekundi ili duža u trajanju od nekoliko desetina sekundi. Emisija BTEX jedinjenja tokom voznog ciklusa primarno je određena potrošnjom goriva u kontrolisanim uslovima sagorevanja definisanih operativnim parametrima motora u posmatranoj radnoj tački. Na osnovu utvrđenih emisionih karakteristika, kreira se odgovarajuća emisiona funkcija, koja omogućava predviđanje emitovane količine BTEX jedinjenja prilikom kretanja putničkog automobila tokom voznog ciklusa. Prilikom razvoja emisionog modela u okviru doktorske disertacije uspostavljena je potpuno nova metoda uzorkovanja na osnovu reprezentativnih radnih tačaka voznog ciklusa.

Model se bavi reakcionim uslovima formiranim tokom gradske vožnje putničkog automobila Fiat Punto Classic (FPC) u skladu sa obrascem NEDC. Prilikom definisanja modela uzeti su u obzir sledeći granični uslovi:

- Vožnja u uslovima umerenog opterećenja ($\xi=10\%$),
- Vožnja asfaltnim putem, po ravnom terenu u skladu sa topografskim karakteristikama najvećih evropskih gradova,
- Regulacija stehiometrijskog odnosa gorivo/vazduh tokom voznog ciklusa uz pomoć λ -sonde ($\lambda=1$).

6.3.1. Potrošnja goriva

Dominantan faktor prilikom predviđanja količine emitovanih BTEX jedinjenja tokom voznog ciklusa predstavlja potrošnja goriva, kao osnovni izvor energije kretanja vozila u skladu sa obrascem NEDC. Celokupna količina BTEX jedinjenja nastalih u procesu sagorevanja goriva raspodeljuje se u atmosferu odakle procesima: transporta, distribucije, raspodele i depozicije polutanti BTEX grupe dospevaju i kontaminiraju ostale kompartimente životne sredine.

Za savladavanje otpora kretanja pri nekoj brzini, pogonskim točkovima je potrebno dovesti odgovarajuću snagu.

$$P = F \cdot v \tag{6.1}$$

Dovođenje snage u toku određenog vremenskog perioda znači potrošnju određene energije za realizaciju te snage.

$$P = dE/dt \Rightarrow E = \int P \cdot dt \tag{6.2}$$

Primarni izvor energije kretanja putničkog automobila predstavlja pogonsko gorivo čija se hemijska energija u motoru transformiše u mehaničku, koju motor dalje stavlja na raspolaganje vozilu za savladavanje otpora kretanja. Potrošnja goriva na nekoj deonici puta zavisi pre svega od ukupne energije potrebne za savladavanje otpora kretanja na toj deonici. S obzirom na prirodu otpora, ukupna energija dalje zavisi od parametara vozila i podloge, njihovih međusobnih interakcija i uslova u kojima se vozilo kreće.

U svrhu procene količine emitovanih BTEX jedinjenja tokom voznog ciklusa rezultati eksperimentalnih ispitivanja, sistematizovani u okviru statističkog modela zavisnosti

koncentracijonih nivoa i radnih parametara eksperimentalnog motora, implementirani su u model kretanja putničkog automobila Fiat Punto Classic (FPC) po obrascu NEDC.

Parametri korišćeni tokom proračuna dati su u tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Tehničke karakteristike putničkog automobila FPC i parametri potrebni za proračun emisije BTEX jedinjenja

Ukupna masa vozila [kg]	950
c_w – empirijski koeficijent otpora vazduha	0,30
A– čeona površina vozila [m^2]	1,85
f- koeficijent otpora kotrljanja	0,01
ρ - gustina vazduha [kg/m^3]	1,2

6.3.2. Energija potrebna za kretanje vozila

Prilikom proračuna energetske potrebe za kretanje putničkog automobila FPC u skladu sa NEDC voznim ciklusom u obzir su uzete komponente otpora kretanju koje je potrebno savladati na određenoj deonici puta. Dominantne komponente otpora kretanju putničkog automobila predstavljaju: otpor inercije, otpor vazduha, otpor kotrljanja i otpor uspona.

Na osnovu veze između energije i snage definišu se relacije na osnovu kojih se izračunava ukupna količina energije potrebna za kretanje vozila na datoj deonici puta pri zadatim uslovima:

$$P_T = \frac{dE}{dt} \Rightarrow E = \int_0^T P_T(t) \cdot dt \quad (6.3)$$

E – energija potrebna za kretanje vozila u vremenskom intervalu dužine T

P_T – potrebna snaga na pogonskom točku (u opštem slučaju menja se u toku vremena sa promenom režima kretanja i spoljnih uslova)

S obzirom na to da potrebna snaga na točku mora biti jednaka ukupnom zbiru parcijalnih snaga potrebnih za savladavanje pojedinih komponenata otpora kretanja, ista relacija se može primeniti i na energiju:

$$E = E_f + E_W + E_{IN} + E_\alpha = \int_0^T P_f(t) \cdot dt + \int_0^T P_W(t) \cdot dt + \int_0^T P_{IN}(t) \cdot dt + \int_0^T P_\alpha(t) \cdot dt \quad (6.4)$$

Gde je:

E_f - energija potrebna za savladavanje otpora kotrljanja

E_W - energija potrebna za savladavanje otpora vazduha

E_{IN} - energija potrebna za savladavanje otpora inercije

E_α - energija potrebna za savladavanje otpora uspona

Imajući u vidu da se potrebna snaga za savladavanje odgovarajućeg otpora kretanju motornog vozila može izračunati kao proizvod sile i odgovarajuće brzine kretanja ($P = F \cdot v$), uzimajući u obzir izraze za izračunavanje pojedinačnih komponenti otpora kretanja ($F_f, F_W, F_{IN}, F_\alpha$), mogu da se dobiju relacije za parcijalne energije utrošene na njihovo savladavanje.

6.3.2.1. Energija potrebna za savladavanje otpora kotrljanja

$$E_f = f \cdot G \cdot \int_0^T v \cdot dt = f \cdot G \cdot S \quad (6.5)$$

S – ukupan pređeni put

f- koeficijent otpora kotrljanja

G- težina vozila (uslovljena masom automobila i putnika $G = m \cdot g$)

Energija koja se troši na savladavanje otpora kotrljanja linearno je proporcionalna sili otpora kotrljanja ($F_f = f \cdot G$) i dužini pređenog puta S. Koeficijent otpora kotrljanja u početku raste veoma sporo sa porastom brzine, dok za veće brzine ima nagliji porast. Različite vrste pneumatika imaju različite karaktere porasta koeficijenta f u funkciji brzine. U literaturi postoji veći broj empirijskih izraza kojima se modelira zavisnost koeficijenta f od brzine. Najbrojniji su polinomi, opšteg oblika:

$$f = C_0 + C_1 \cdot v + C_2 \cdot v^2 + C_3 \cdot v^3 + C_4 \cdot v^4 + \dots \quad (6.6)$$

Prosečne vrednosti koeficijentata iznose približno:

$$C_0 = 0,01$$

$$C_1 = 5,42 \cdot 10^{-6}$$

$$C_2 = 1,05 \cdot 10^{-11}$$

Orientaciona vrednost koeficijenta f na tvrdi podlozi (za vozilo u mirovanju ili pri maloj brzini kretanja).

$$f_0 = 0,01 \text{ – za putnička vozila}$$

$$f_0 < 0,01 \text{ – za teretna vozila}$$

6.3.2.2. Energija potrebna za savladavanje otpora vazduha

$$E_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_w \cdot A \cdot \int_0^T v^3 \cdot dt \quad (6.7)$$

ρ - gustina vazduha

C_w - empirijski koeficijent otpora vazduha

Kada se brzina menja u toku vremena, može se napisati:

$$v(t) = \bar{v} + \Delta v(t)$$

gde je:

\bar{v} – srednja vrednost brzine

$\Delta v(t)$ - trenutna vrednost odstupanja brzine od srednje vrednosti.

Uz pretpostavku simetrične raspodele odstupanja brzina oko srednje vrednosti, važi:

$$\overline{\Delta v} = \overline{\Delta v^3} = 0$$

Pri tome je: $\overline{\Delta v^2} = \sigma^2$ - standardno odstupanje.

Sređivanjem se dobija:

$$E_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_w \cdot A \cdot v^{-2} \cdot \left(1 + \frac{3\sigma^2}{v}\right) \quad (6.8)$$

Odavde sledi važan zaključak da fluktuacija brzine oko srednje vrednosti brzine povećava potrebnu energiju za savladavanje otpora vazduha, dakle potrošnja goriva usled otpora vazduha za istu prosečnu brzinu raste kada brzina intenzivnije varira tokom vremena.

6.3.2.3. Energija potrebna za savladavanje otpora inercije

$$\dot{v} > 0 \Rightarrow E_{IN} = \delta \cdot \frac{G}{g} \int_0^T v \cdot v \cdot dt = \delta \frac{G}{g} \int_0^T v \cdot dv = \Delta E_K \quad (6.9)$$

Energija potrebna da se savlada otpor inercije pri ubrzavanju vozila jednaka je kinetičkoj energiji koju treba saopštiti vozilu. Ciklusi pri kojima se povećava brzina utiču na povećanje potrošnje goriva, proporcionalno težini vozila.

Upotrebom sistema za rekuperaciju kinetičke energije može se poboljšati energetski bilans vozila, odnosno smanjiti potrošnja goriva u vožnji promenljivom brzinom. Kod ovakvih sistema kinetička energija se u fazi kočenja prevodi u potencijalnu (npr. korišćenjem elektrogeneratora, zamajca, hidrostatičkog sistema itd.), da bi potom ponovo bila stavljena na raspolaganje pri sledećem ubrzavanju vozila. Uzimajući u obzir da se svi procesi konverzije energije iz jednog oblika u drugi odvijaju uz određene gubitke, kinetičku energiju nije moguće u potpunosti skladištiti i u punom iznosu ponovo iskoristiti (Guzella i Sciarretta, 2013).

6.3.2.4. Energija potrebna za savladavanje otpora uspona

$$E_\alpha = G \cdot \sin \alpha \int_0^T v \cdot dt = G \cdot \sin \alpha \cdot S = G \cdot H \quad (6.10)$$

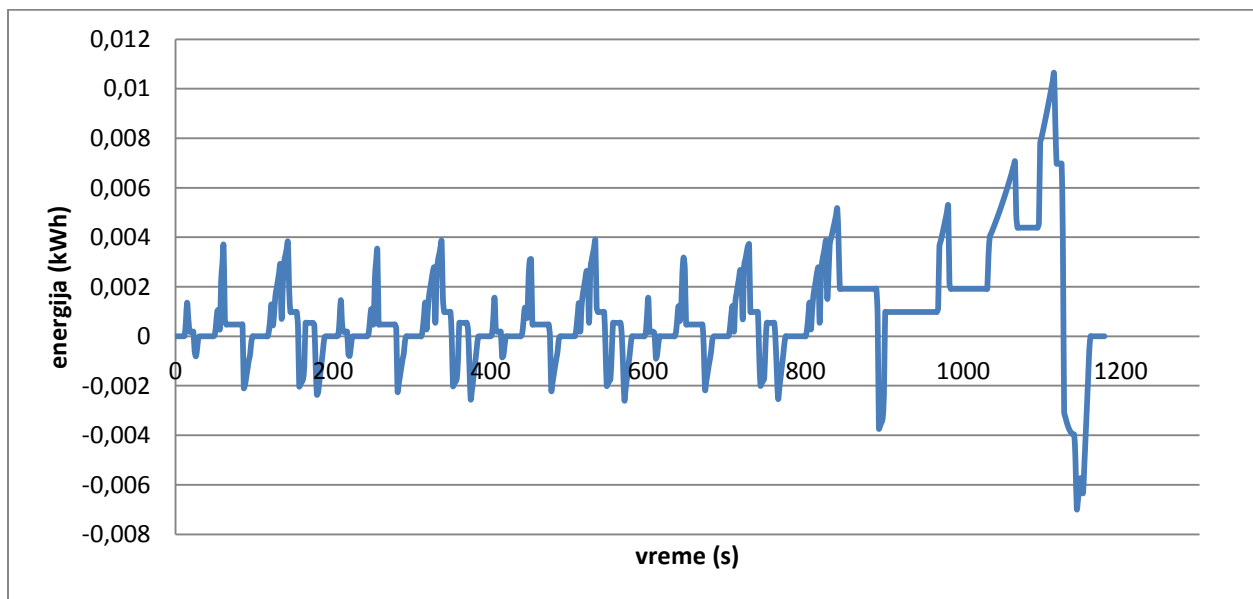
$H = S \cdot \sin \alpha$ – visina penjanja

Energija koja se troši na savladavanje otpora uspona linearno je proporcionalna težini vozila G i visini penjanja H .

Energija potrebna za savladavanje otpora uspona predstavlja deo energije se u potpunosti „vraća nazad“ vozilu pri kasnijem spuštanju niz nagib. Energija otpora vazduha i otpora kotrljanja se u potpunosti transformišu u energiju toplotnih gubitaka. Energija potrebna za savladavanje otpora

inercije može se, u slučaju postojanja sistema za rekuperaciju kinetičke energije, delimično ponovo iskoristiti, odnosno delom prevoditi u potencijalnu, a nakon toga ponovo delom u kinetičku.

Uzimajući u obzir tehničke karakteristike putničkog automobila Fiat Punto Classic date u tabeli 6.1, proračunata je potrebna količina energije tokom vožnje po obrascu kretanja u skladu sa NEDC. Prilikom proračuna je zanemarena komponenta savladavanja otpora uspona, pošto je fokus procene emitovanih količina BTEX jedinjenja usmeren na Novi Sad, čija topografija omogućava zanemarivanje pomenute komponente otpora. Potrebna energija za kretanje putničkog automobila FPC, po obrascu NEDC prikazana je na slici 6.6.



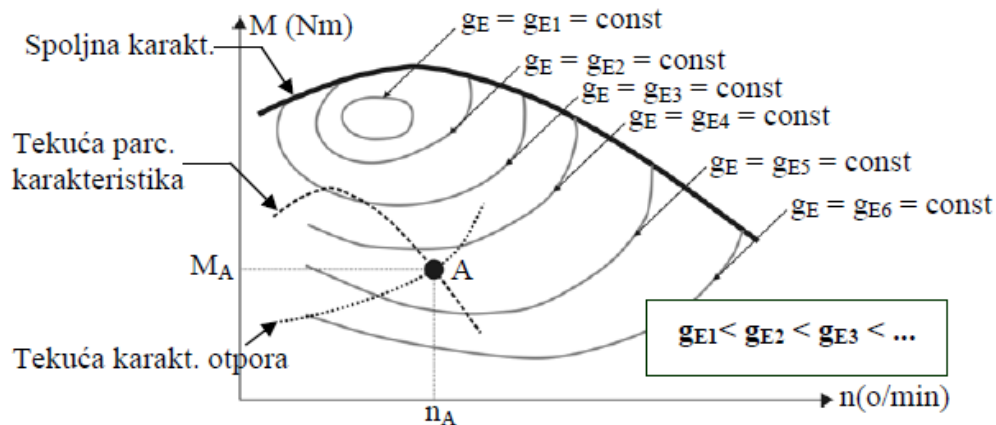
Slika 6.6. Potrošnja energije putničkog automobila Fiat Punto Classic tokom NEDC

6.3.3. Specifična efektivna potrošnja goriva

Specifična efektivna potrošnja goriva g_E predstavlja količinu goriva potrošenog po jedinici energije koju motor proizvede, iskazanu kroz masu potrošenog goriva. Jedinica u kojoj se data veličina iskazuje je g/kWh (ili kg/kWh). Za jedinicu energije uzet je kWh, što nije standardna jedinica za energiju, ali se u tehnici često koristi.

Ako se pri režimu na kom motor odaje efektivnu snagu P_E [kW], merenjem utvrdi časovna potrošnja goriva G_h [g/h], tada na tom režimu specifična efektivna potrošnja goriva iznosi:

$$g_E = \frac{G_h}{P_E}, \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (6.11)$$



Slika 6.7. Školjkasti dijagram (Stojić, 2009)

Specifična efektivna potrošnja može biti prikazana preko brzinske karakteristike, tj. za konstantan položaj dela uređaja za regulaciju opterećenja motora. U praksi je međutim, kada je u pitanju analiza potrošnje goriva za neko vozilo u posmatranim uslovima, od mnogo većeg značaja tzv. „školjkasti dijagram“, slika 6.7. Naziv potiče od izgleda niza krivih koje povezuju tačke sa jednakom specifičnom efektivnom potrošnjom, g_{E1} , g_{E2} , g_{E3} , itd. Na dijagramu prikazana je i spoljna karakteristika obrtnog momenta. Motor može, prelaskom na parcijalne karakteristike, da radi na bilo kojoj radnoj tački koja se nalazi ispod spoljne karakteristike. Za određivanje specifične potrošnje goriva potrebno je poznavati radni režim motora, odnosno broj obrtaja na kom motor radi i obrtni moment koji odaje. Kriva konstantne specifične potrošnje povezuje sve parove vrednosti momenta i broja obrtaja za koje je potrošnja jednaka, a koliko ona iznosi, po pravilu stoji naznačeno uz samu krivu.

Ako se režim motora nalazi u tački A, slika 6.7, tj. $M = M_A$, $n = n_A$. U posmatranom slučaju kroz radnu tačku A ne prolazi ni jedna od krivih $g_E = \text{const}$, već se ona nalazi između krivih $g_E = g_{E4}$ i

$g_E = g_{E5}$. U takvom slučaju, u praksi je najčešće dovoljno procenom odrediti vrednost g_E , što međusobni položaj krivih najčešće omogućava. U slučaju zahteva za većom tačnošću očitavanja, može se, prema potrebi, primeniti postupak interpolacije. Kada je očitavanjem određena vrednost za specifičnu efektivnu potrošnju goriva u tački A, tj. g_{EA} , potrebno je, da bi se odredila potrošnja goriva na sat, izračunati snagu koju motor odaje u radnoj tački A:

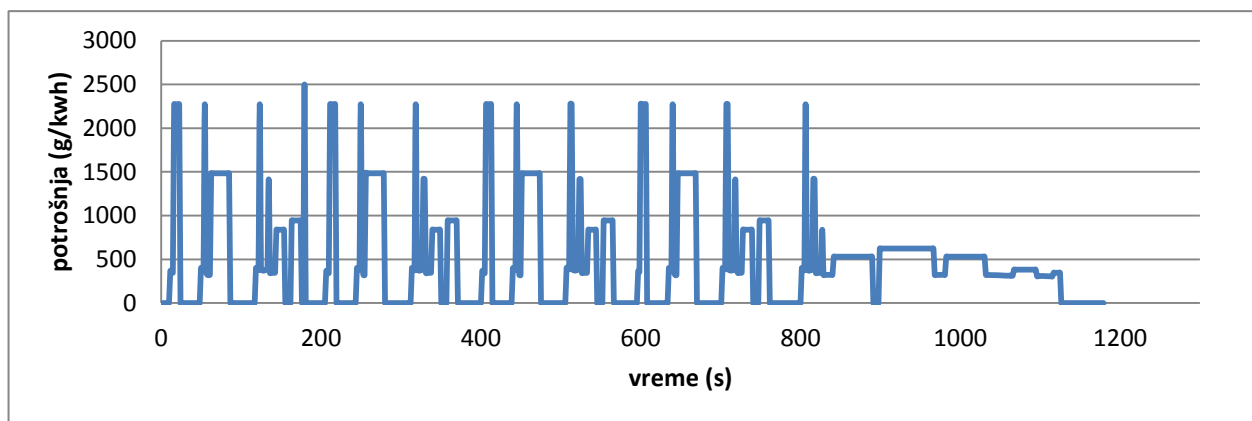
$$P_A = \frac{M_A \cdot n_A}{9554} \quad (6.12)$$

Potom se izračunava časovna potrošnja goriva pri radu motora u tački A:

$$G_{hA} = g_{EA} \cdot P_A \quad [\text{g/h}] \quad (6.13)$$

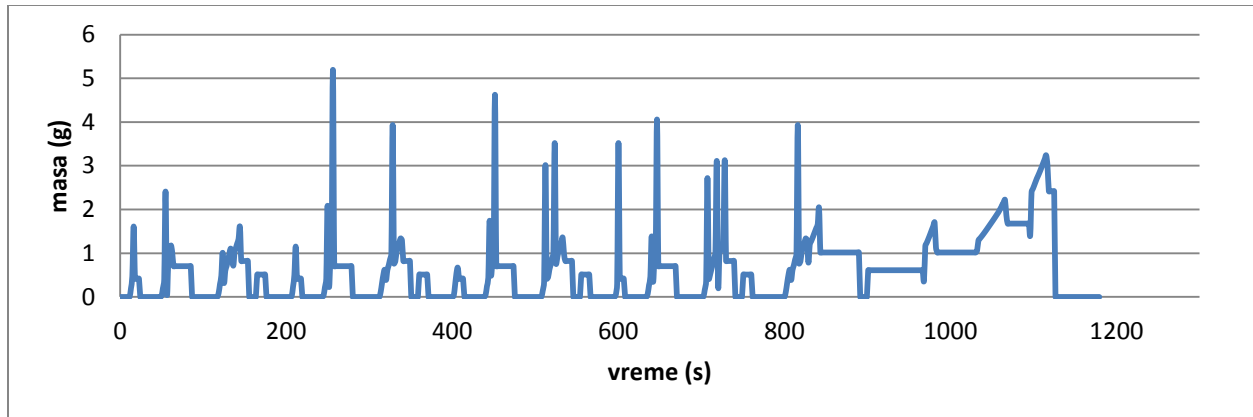
Iz časovne potrošnje se dalje, prema potrebi, lako može izračunati potrošnja u jedinicama zapremine po jedinici pređenog puta (npr., kako je uobičajeno, u l/100km), koristeći podatke o brzini kretanja (km/h) i specifičnoj masi goriva (kg/m^3).

Korišćenjem softverskog paketa GT power izračunata je specifična potrošnja goriva u (g/kWh) tokom NEDC za Fiat Punto Classic.



Slika 6.8. Specifična potrošnja goriva tokom NEDC, za Fiat Punto Classic.

U skladu sa energetske potrebama za savladavanje otpora prilikom kretanja putničkog automobila FPC proračunata je potrebna masa goriva potrebna tokom kretanja po obrascu NEDC (slika 6.9).

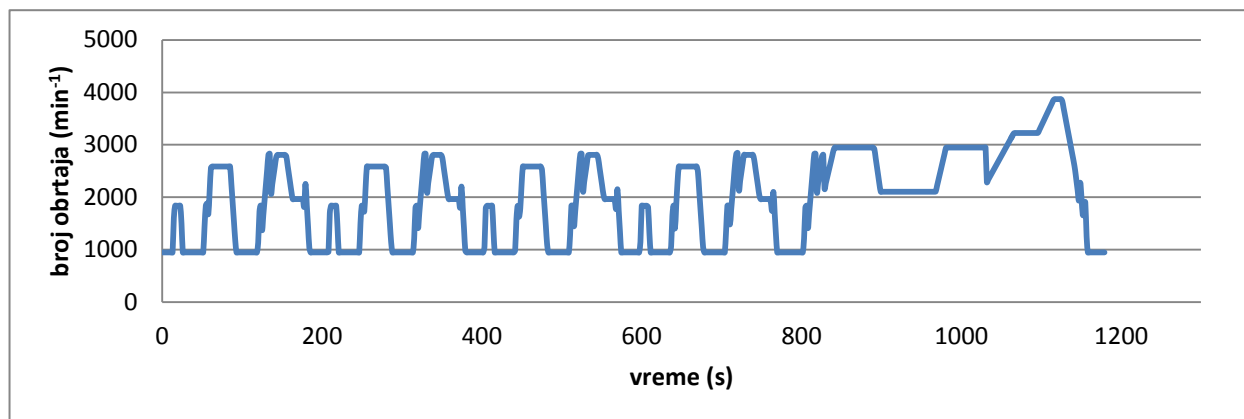


Slika 6.9. Potrebna masa goriva za kretanje putničkog automobila FPC po obrascu NEDC

6.4. Model emisije BTEX jedinjenja za Fiat Punto Classic

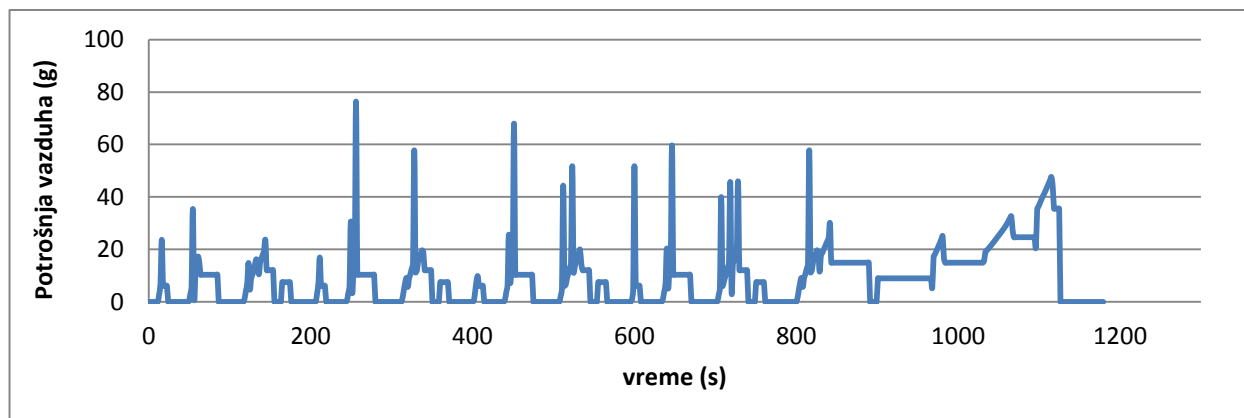
Tokom kampanje eksperimentalnih merenja i definisanja statističkog modela emisije BTEX jedinjenja korišćene su dve vrste pogonskog goriva: benzin proizveden prema EU standardima, tzv. Europremium i bezolovni benzin proizveden u pogonima NIS-a. Prilikom definisanja emisionog modela i procene količina emitovanih BTEX jedinjenja putničkog automobila FPC, razmatran je uticaj vrste pogonskog goriva na koncentracione nivoe, kao i na ukupno emitovanu količinu BTEX jedinjenja tokom NEDC. Tokom postupka definisanja modela emisije uzeto je u obzir da je u pitanju savremeni putnički automobil opremljen λ -sondom, tako da se prilikom definisanja odgovarajućih radnih tačaka polazi od pretpostavke da se sve vreme radi o stehiometrijskom odnosu benzina i vazduha u napojnoj gorivoj smeši. Kretanje putničkog automobila po obrascu NEDC, odgovara uslovima niskog opterećenja, što predstavlja još jednu od smernica prilikom definisanja odgovarajućih radnih tačaka prilikom procene emisije BTEX jedinjenja. Na osnovu rezultata statističkog modela, koncentracioni nivoi BTEX jedinjenja definisani su radnim tačkama koje odgovaraju stehiometrijskom odnosu goriva i vazduha ($\lambda=1$) i uslovima niskog opterećenja (10%), pri odgovarajućem broju obrtaja.

Na slici 6.10 data je zavisnost broja obrtaja od vremena putničkog automobila FPC koji se kreće po obrascu NEDC.



Slika 6.10. Zavisnost broja obrtaja od vremena prilikom kretanja FPC po obrascu NEDC

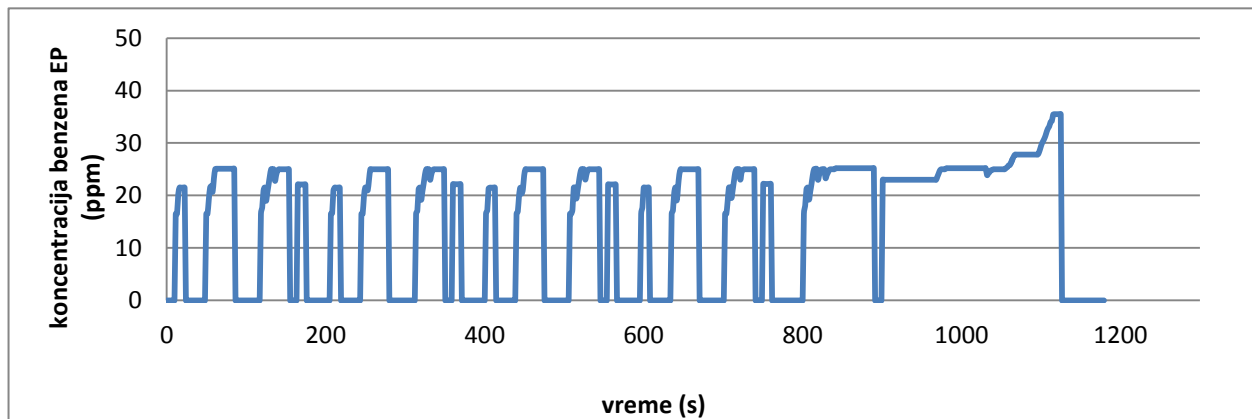
Na osnovu poznate potrošnje goriva tokom NEDC i uslova da je za svaki gram potrošenog goriva u stehiometrijskim uslovima potrebno utrošiti 14,7 g vazduha može se izračunati i potrošnja vazduha tokom NEDC, što je prikazano na slici 6.11.



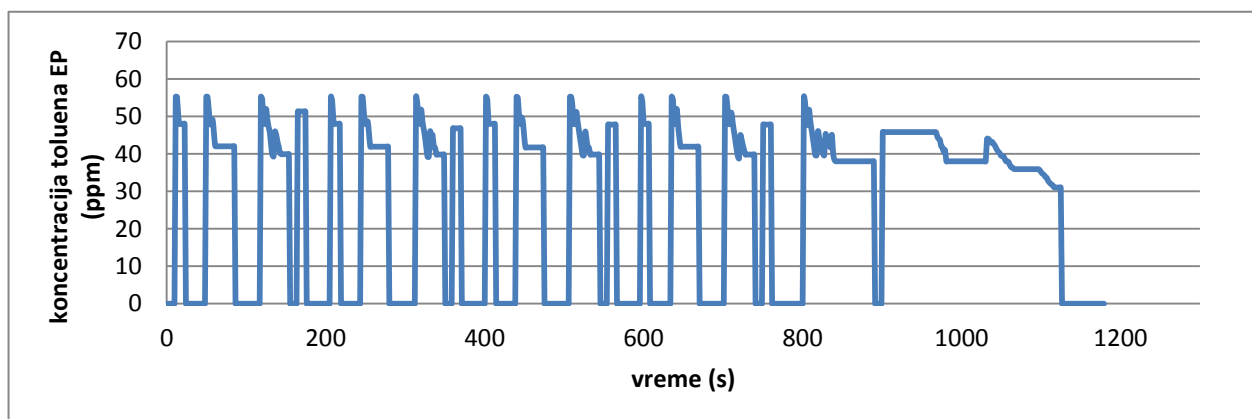
Slika 6.11. Potrošnja vazduha tokom NEDC

6.5. EUROPREMIUM

Na osnovu zavisnosti broja obrtaja od vremena putničkog automobila FPC, prilikom kretanja po obrascu NEDC, definisane su karakteristične radne tačke koje odgovaraju uslovima stehiometrijske smeše ($\lambda=1$) i niskog opterećenja (10%). U skladu sa rezultatima statističkog modela, na osnovu odgovarajućih radnih tačka, određene su zavisnosti koncentracionih nivoa emitovanih BTEX jedinjenja sa vremenom tokom NEDC. Za gorivo Europremium promene koncentracionih nivoa benzena i toluena tokom NEDC grafički su prikazane na slikama 6.12 i 6.13. Promene koncentracionih nivoa tokom NEDC za preostala jedinjenja BTEX grupe date su graficima u Prilogu III.



Slika 6.12. Zavisnost koncentracije emitovanog benzena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo Europremium.



Slika 6.13. Zavisnost koncentracije emitovanog toluena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo Europremium.

Na osnovu masa potrošenog goriva i vazduha u procesu sagorevanja izračunata je količina gasa na izduvu.

$$n_g = m_g \cdot M_g [\text{mol}] \quad (6.14)$$

$$n_v = m_v \cdot M_v [\text{mol}] \quad (6.15)$$

Pri čemu je:

- m_g - masa sagorelog goriva [g],
- m_v - masa vazduha potrebnog za sagorevanje [g]
- M_g - srednja molarna masa benzina (108 g/mol ATSDR),
- M_v - srednja molarna masa vazduha (29 g/mol)

Ukupna količina gasa na izduvu se dobija kao zbir pomenutih količina.

$$n = n_g + n_v [\text{mol}] \quad (6.16)$$

U jednačini:

- n_g - količina sagorelog goriva
- n_v - količina potrošenog vazduha

Ukupna zapremina gasa na izduvu se računa na osnovu Klapejronove jednačine po kojoj je:

$$V = \frac{nRT}{p} [\text{m}^3] \quad (6.17)$$

Gde je:

- V - zapremina izduvnih gasova
- R - univerzalna gasna konstanta (8,314 J/molK)
- T - temperatura izduvnih gasova (600°C, 873°K)
- p - pritisak na izduvu (101325 Pa)

Izmereni koncentracioni nivoi BTEX jedinjenja dati u okviru Priloga I i sistematizovani u okviru statističkog modela omogućavaju izračunavanje zapremine ciljanog jedinjenja.

$$V_{B,T,E,X} = C_{B,T,E,X} [ppm] \cdot V \cdot 10^{-6} [m^3] \quad (6.18)$$

$V_{B,T,E,X}$ - zapremina odgovarajućeg BTEX jedinjenja [m^3]

$C_{B,T,E,X}$ - koncentracija odgovarajućeg BTEX jedinjenja [ppm]

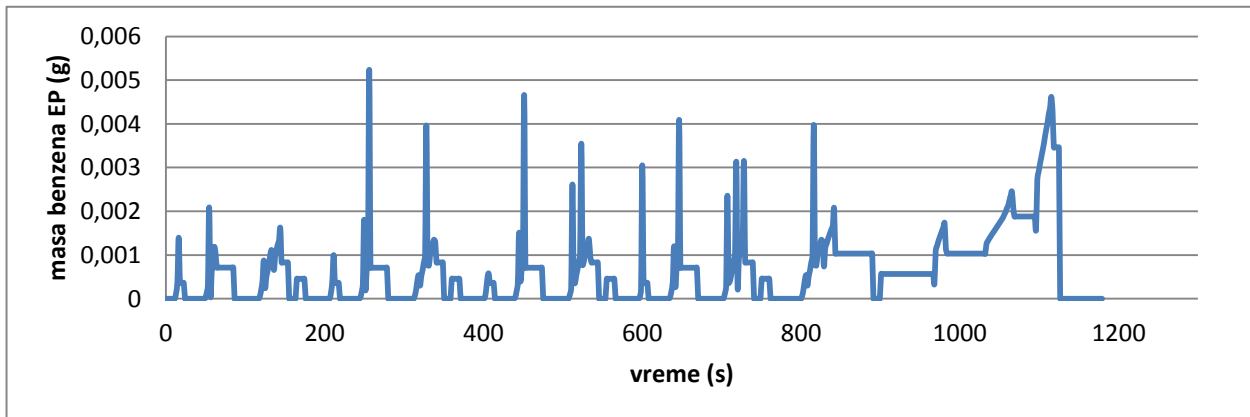
Na osnovu podataka o zapreminama i molarnim masama mogu se izračunati mase emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC.

$$m_{B,T,E,X} = \frac{p \cdot V_{B,T,E,X} \cdot M_{B,T,E,X}}{RT} [g] \quad (6.19)$$

U jednačini:

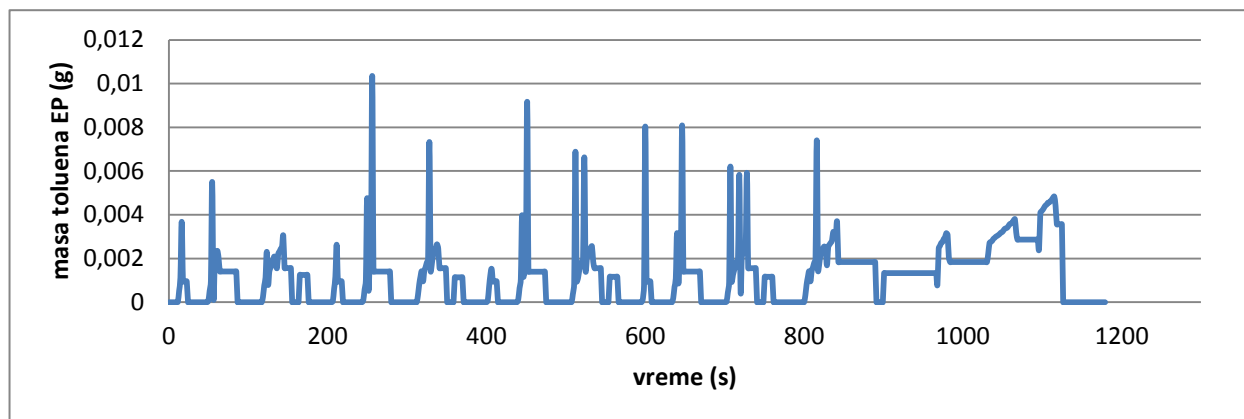
- $m_{B,T,E,X}$ - masa ciljanog BTEX jedinjenja [g]
- $M_{B,T,E,X}$ - molarna masa ciljanog BTEX jedinjenja [g/mol]

Gore navedenim izrazima u kombinaciji sa rezultatima statističkog modela, definisanog na osnovu karakterističnih radnih tačaka, procenjuju se mase emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC. Zavisnost mase emitovanog benzena i toluena sa vremenom tokom NEDC prikazana je grafički na slikama 6.14 i 6.15. Mase preostalih jedinjenja BTEX grupe emitovanih tokom NEDC voznog ciklusa date su graphicima u Prilogu III.



Slika 6.14. Masa benzena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja EP benzina

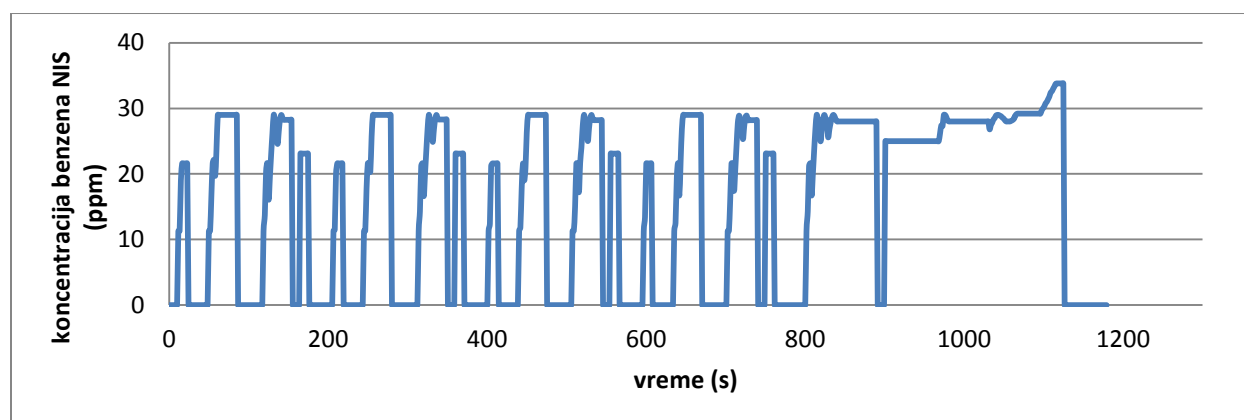
Ukupna masa emitovanog benzena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,4514 g.



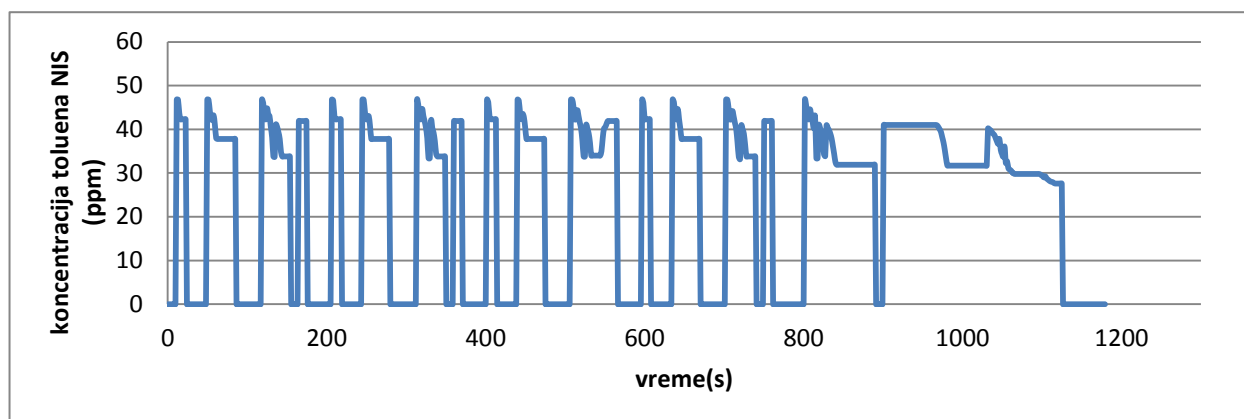
Slika 6.15. Masa toluena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja EP benzina
 Ukupna masa emitovanog toluena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,8559 g.

6.6. NIS gorivo

Potpuno analognim razmatranjima, kao i u slučaju goriva Europremium, dolazi se do rezultata modela u slučaju upotrebe NIS benzina kao pogonskog goriva. Na osnovu zavisnosti broja obrtaja sa vremenom putničkog automobila FPC, prilikom kretanja po obrascu NEDC, definisane su radne tačke koje odgovaraju uslovima stehiometrijske smeše ($\lambda=1$) i niskog stepena opterećenja (10%). Korišćenjem rezultata statističkog modela, određene su zavisnosti koncentracionih nivoa emitovanih BTEX jedinjenja sa vremenom tokom NEDC. Za gorivo NIS, zavisnosti promene koncentracionih nivoa benzena i toluena sa vremenom tokom NEDC grafički su prikazane na slikama 6.16 i 6.17. Promene koncentracionih nivoa ostalih jedinjenja BTEX grupe prikazane su graphicima u Prilogu IV.

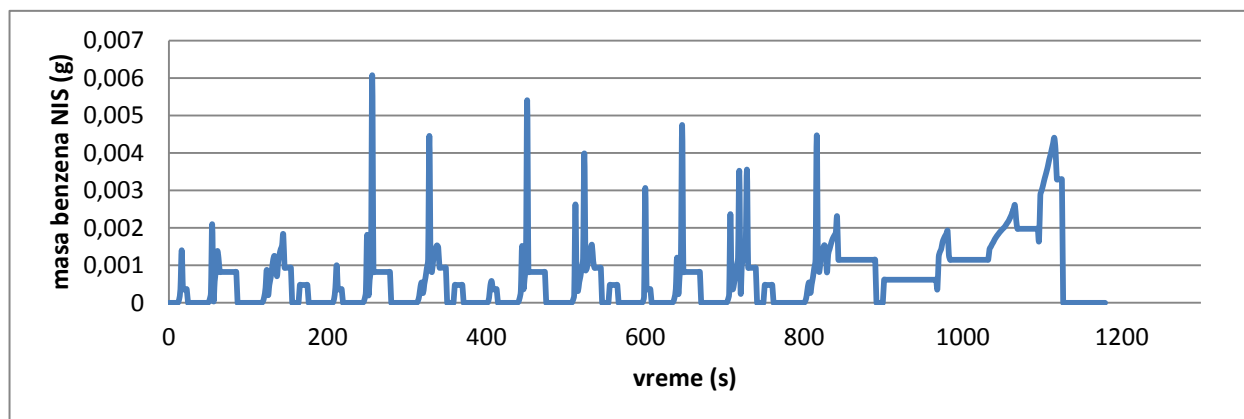


Slika 6.16. Zavisnost koncentracije emitovanog benzena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo NIS.



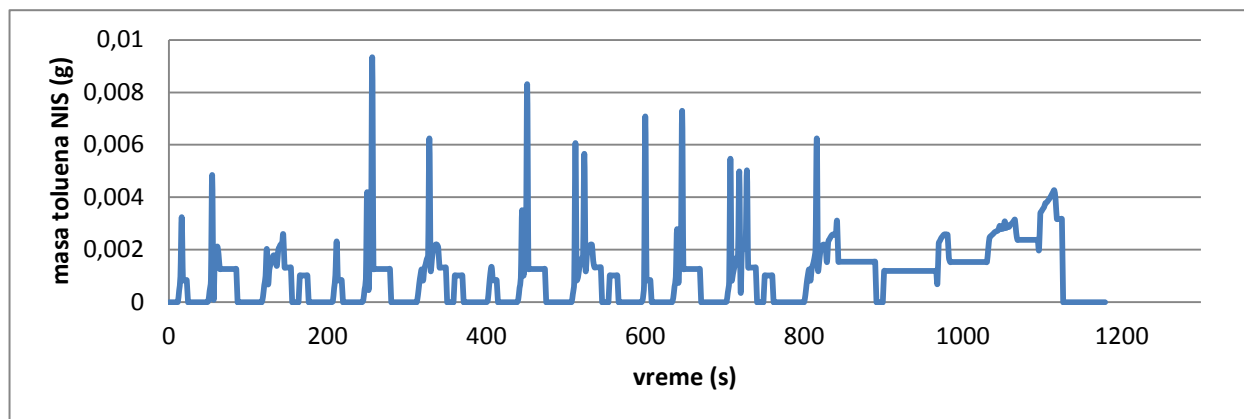
Slika 6.17. Zavisnost koncentracije emitovanog toluena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo NIS.

Na osnovu definisane zavisnosti koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja sa vremenom, po istom modelu kao i u slučaju goriva Europremium procenjene su mase BTEX komponenti emitovane tokom NEDC korišćenjem NIS benzina kao pogonskog goriva. Rezultati implementacije modela na primeru benzena i toluena grafički su prikazani na slikama 6.18 i 6.19. Mase preostalih jedinjenja BTEX grupe emitovanih tokom NEDC voznog ciklusa prikazane su graficima datim u Prilogu IV.



Slika 6.18. Masa benzena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja NIS benzina.

Ukupna masa emitovanog benzena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,4885 g.



Slika 6.19. Masa toluena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja NIS benzina

Ukupna masa emitovanog toluena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,7454 g.

6.7. Komparacija rezultata modela za Europremium i NIS gorivo

Nakon izvedenih eksperimentalnih ispitivanja i implementacije rezultata u odgovarajući model kretanja po obrascu NEDC, koji omogućava komparaciju i ponovljivost emisisionih testova, dobijeni rezultati o masama emitovanih BTEX jedinjenja prikazani su u tabelama 6.2 i 6.3. Uzimajući u obzir činjenicu da je teoretski pređeno rastojanje tokom jednog ciklusa po obrascu NEDC iznosi 11023m, veoma jednostavno se može izračunati masa emitovanih BTEX komponenti na 100 km, kao i specifična emisija u g/km pređenog puta u skladu sa usvojenim obrascem kretanja. U tabeli 6.2 su prikazane mase emitovanih BTEX jedinjenja prilikom korišćenja pogonskog goriva Europremium.

Tabela 6.2. Mase emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC voznog ciklusa, pogonsko gorivo Europremium

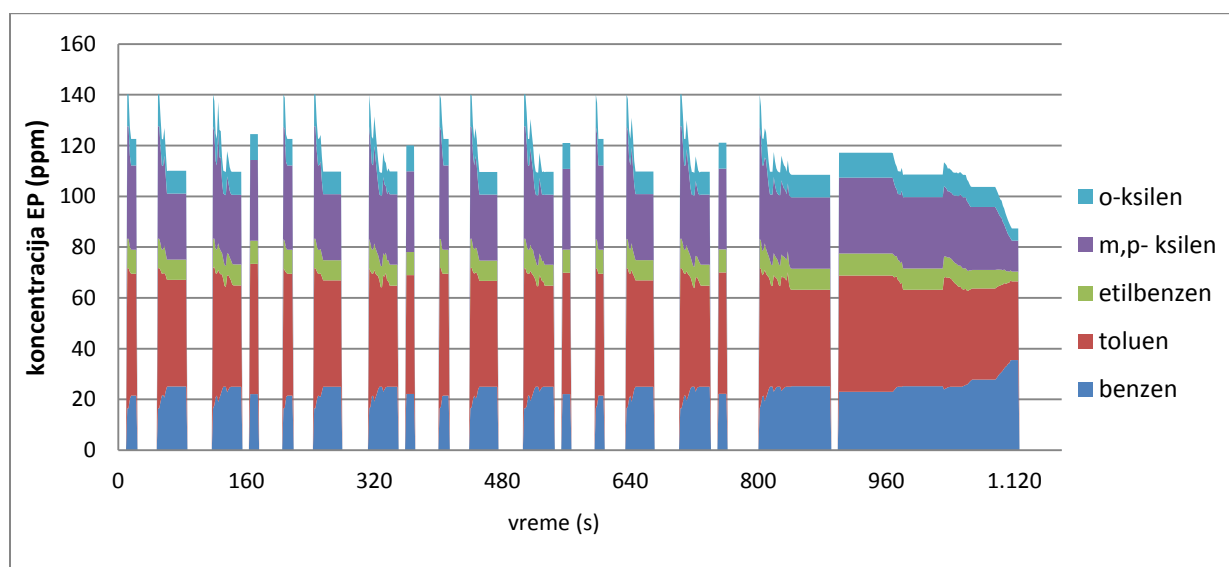
Komponenta	Emisija tokom jednog NEDC [g]	Emisija na 100 km po obrascu NEDC [g]	Specifična emisija [g/km]
Benzen	0,4514	4,0951	0,0410
Toluen	0,8559	7,7647	0,0776
Etilbenzen	0,1931	1,7518	0,0175
m,p-ksilen	0,6526	5,9203	0,0592
o-ksilen	0,2137	1,9387	0,0194

U tabeli 6.3 su prikazane mase emitovanih BTEX jedinjenja prilikom korišćenja NIS benzina kao pogonskog goriva.

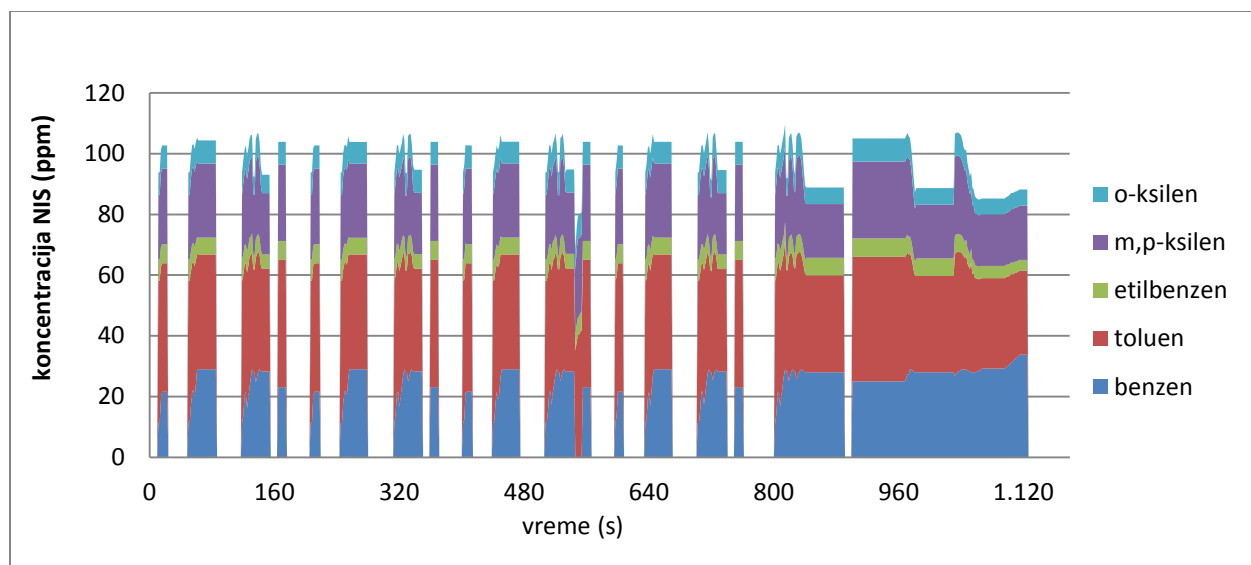
Tabela 6.3. Mase emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC voznog ciklusa, pogonsko gorivo NIS benzin

Komponenta	Emisija tokom jednog NEDC [g]	Emisija na 100 km po obrascu NEDC [g]	Specifična emisija [g/km]
Benzen	0,4885	4,4316	0,0443
Toluen	0,7454	6,7622	0,0676
Etilbenzen	0,1278	1,1593	0,0116
m,p-ksilen	0,5175	4,6947	0,0469
o-ksilen	0,1583	1,4360	0,0144

Komparacija rezultata modela emisije za dve vrste pogonskog goriva ukazuje na emisiju veće ukupne količine BTEX jedinjenja u slučaju korišćenja Europremiuma. Ukupna masa emitovanih BTEX jedinjenja u slučaju korišćenja Europremiuma je za 16% veća u odnosu na emitovanu masu BTEX jedinjenja pri korišćenju NIS goriva, što dodatno ilustruju grafički prikazi na slikama 6.20 i 6.21. Mase emitovanih jedinjenja tokom NEDC veće su za sve komponente iz grupe BTEX, izuzev benzena koji predstavlja najtoksičniju supstancu i kancerogen prve kategorije prema klasifikaciji IARC.



Slika 6.20. Ukupna količina emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC, gorivo Europremium



Slika 6.21. Ukupna količina emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC, gorivo NIS

7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Na osnovu analize rezultata detekcije i kvantifikacije koncentracionih nivoa benzena, toluena, etilbenzena i izomera ksilena (BTEX- jedinjenja) dobijenih u okviru eksperimentalnih ispitivanja zavisnosti različitih radnih režima eksperimentalnog motora Fiat 1,1 EFI i koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja u smešama izduvnih gasova sprovedenih tokom izrade doktorske disertacije, uzimajući u obzir praćenje fenomena ukupne kontaminacije životne sredine, a posebno vazduha/atmosfere, izvedena su sledeća šira zaključna razmatranja.

Prisustvo visokih koncentracionih nivoa hazardnih polutanata iz grupe BTEX u izduvnim gasovima motornih vozila javlja se kao rezultat supstitucije alkilnih derivata olova, kao antidetonatora, aromatičnim jedinjenjima u bezolovnim benzinima. Smeša aromatičnih ugljovodonika i aditiva povećava oktanski broj i otpornost benzina ka detonantnom sagorevanju. Aromati zbog visokog energetskeg sadržaja utiču na nižu potrošnju goriva i pružaju mogućnost ostvarivanja višeg stepena kompresije, kao dominantnog faktora ekonomičnosti radnog ciklusa. Uz povećanje stepena kompresije obezbeđuje se viša temperatura sagorevanja, veći stepen ekspanzije produkata sagorevanja, bolje iskorišćenje oslobođene količine toplote, ušteda goriva i poboljšanje voznih karakteristika. Negativan uticaj visokog sadržaja aromata u bezolovnim benzinima se ogleda u emisiji velikih količina kancerogena iz grupe BTEX u životnu sredinu, čime je praktično izvršena zamena jednog problema drugim. Globalni procesi raspodele, transporta i distribucije aromata u okruženju čine problem supstitucije olova kao antidetonatora u bezolovnim benzinima još većim.

Tokom istraživanja i eksperimentalnog dela rada sagledano je na koji način različiti režimi rada eksperimentalnog motora utiču na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja, u cilju procene emitovanih količina prilikom kretanja putničkog automobila po unapred zadatom obrascu kretanja u skladu sa NEDC voznim ciklusom (New European Driving Cycle), ustanovljenim modulom kojeg je dužan da se pridržava proizvodna kompanija prilikom sertifikacije emisije i merenja potrošnje goriva u EU.

Praćen je i ispitivan pojedinačni i zajednički uticaj različitih operativnih parametra eksperimentalnog motora na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja u izduvnim gasnim

smešama. Radni parametri motora koji su praćeni tokom istraživanja uključuju: stepen opterećenja (ξ), broj obrtaja eksperimentalnog motora (n), kao i različit odnos goriva i vazduha u napojnoj smeši (λ). Rezultatima statističkog modela ukazano je na uticaj operativnih parametara i različitih radnih režima eksperimentalnog motora na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja u smeši izduvnih gasova.

Radi pouzdanog hladnog starta, motoru je neophodno obezbediti smešu sa viškom goriva ($\lambda < 1$). Zbog bogate smeše gorivo/vazduh, tokom hladnog starta, u izduvnim gasovima prisutna je veća količina nesagorelih ugljovodonika i ugljen monoksida, kao i jedinjenja iz grupe BTEX-a. Zaostali produkti nepotpunog sagorevanja gorive smeše imaju negativan uticaj na rad motora: smanjuju radnu zapreminu na račun zapremine nove smeše čime smanjuju snagu motora, zagrevaju novousisanu radnu smešu u nepovoljnom trenutku povećavajući unutrašnju energiju u trenutku kada treba da se vrši rad na radnom telu. Povećanje vrednosti koeficijenta viška vazduha tokom eksperimentalnih istraživanja ima pozitivan uticaj na sniženje koncentracionih nivoa svih jedinjenja BTEX grupe. Mali višak vazduha obezbeđuje povoljnije uslove za sagorevanje, samim tim i sniženje koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja u izduvnim gasovima. Mogućnost porasta koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja postoji i u zoni siromašne smeše prilikom nekontrolisanog povećanja vrednosti λ -faktora. Razlog za povećani udeo BTEX jedinjenja u siromašnoj smeši je ranije gašenje gorive smeše u cilindrima, usled čega ne sagoreva celokupna pristigla masa goriva.

Tokom eksperimentalnih istraživanja praćen je i uticaj faktora opterećenja na koncentracione nivoe BTEX jedinjenja. Opterećenje utiče na dužinu i kvalitet procesa sagorevanja. Velika opterećenja utiču na drastično povećanje temperature motora i katalizatora. Performanse motora pri visokom opterećenju se poboljšavaju korišćenjem bogatije smeše gorivo/vazduh što pruzrokuje povećanje emisije BTEX jedinjenja, koje se približavaju emisijama hladnog starta. Procenat zaostalih gasova se povećava sa obaranjem opterećenja motora.

Opterećenje se menja sa promenom poprečnog preseka u usisnom kolektoru. Putem gušenja na leptiru, pri istom broju obrtaja u cilindar se usisava manja količina smeše, čijim se sagorevanjem oslobađa manja količina toplote. Samim tim manja je i razvijena snaga u datim uslovima. Efikasnost motora je veća pri punom opterećenju. Rezultati statističkog modela ukazuju na značajan uticaj faktora opterećenja pre svega na koncentracione nivoe benzena i toluena, koji se

snižavaju sa povećanjem stepena opterećenja. Takođe je pokazano da ne postoji statistički značajan uticaj faktora opterećenja na ostale komponente iz grupe BTEX.

Ekonomičnost vožnje se postiže u zoni srednjih brojeva obrtaja i opterećenju koje je manje od maksimalnog. Rezultati post-hoc statističkih testova pokazuju da ne postoje statistički značajne razlike u koncentracijama benzena posmatrano samo u odnosu na faktor broja obrtaja motora. Kod ostalih komponenti iz grupe BTEX uočeno je statistički značajno sniženje koncentracionih nivoa pri nezavisnom povećanju broja obrtaja eksperimentalnog motora.

U okviru doktorske disertacije razvijen je emisioni model zasnovan na laboratorijskim merenjima i simuliranju realnih situacija u saobraćaju. Testiranja emisionih karakteristika su sprovedena u karakterističnim radnim tačkama. Prepoznajući nedostatke emisionih modela na bazi prosečne brzine, model emisije BTEX jedinjenja prikazan u okviru doktorske disertacije uključuje modove ubrzanja, usporenja, mirovanja i periode stabilne vožnje. Kao pogodan metod za karakterizaciju različitih operativnih modova, predloženo je kreiranje odgovarajuće emisione funkcije koja povezuje reprezentativne tačke voznog ciklusa sa koncentracionim nivoima emitovanih BTEX jedinjenja dobijenih eksperimentalnim putem u karakterističnim radnim tačkama. Sa takvom emisionom funkcijom moguće je predvideti emisije koje su u vezi sa različitim operativnim modovima. Pomenuta emisiona funkcija omogućava multipliciranje. Aktivnost vozila može biti podeljena tako da svaki deo predstavlja vreme provedeno u odgovarajućem modu. Rezultat predstavlja ukupnu količinu emisije produkovanu tokom aktivnosti povezanih sa odgovarajućom emisionom funkcijom.

Eksperimentalna istraživanja u okviru doktorske disertacije su sprovedena tokom dve kampanje u kojima su korišćene dve vrste goriva različitog kvaliteta: Europremium i NIS bezolovni benzin. Rezultati modela prilikom kretanja automobila u skladu sa obrascem NEDC, ukazuju na ukupnu emisiju BTEX jedinjenja koja je za 16% viša prilikom korišćenja Europremiuma kao pogonskog goriva u odnosu na emisije BTEX jedinjenja prilikom korišćenja NIS-ovog benzina. Posebno se ističu znatno viši koncentracioni nivoi benzena kao najtoksičnije komponente i kancerogena I kategorije prema IARC (International Agency for Research on Cancer) klasifikaciji u izduvnim gasovima prilikom korišćenja NIS-ovog benzina kao pogonskog goriva.

Ispitivanja zavisnosti koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja i operativnih parametara eksperimentalnog motora Fiat 1,1 EFI sprovedena su u Laboratoriji za motore i motorna vozila Departmana za Mehanizaciju i konstrukciono mašinstvo i Laboratoriji za monitoring deponija, otpadnih voda i vazduha Departmana za Inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštitu na radu, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Ukazano je na opšti problem prisustva, transporta, depozicije i raspodele BTEX jedinjenja u svim kompartimentim životne sredine.

Ovakav tip ispitivanja zavisnosti koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja u smešama izduvnih gasova u funkciji optimalnog radnog režima eksperimentalnog motora i pogonskog goriva različitog kvaliteta se sprovodi po prvi put i spada u istraživanja najnovijeg trenda naučne javnosti.

8. LITERATURA

- Abdul A.S, Gibson T.L, Rai D.N 1987. Statistical correlations for predicting the partition coefficient for nonpolar organic contaminants between aquifer organic carbon and water. *Hazardous Waste and Hazardous Materials* 4: 211-222.
- Adamović D., Dorić J., Vojinović-Miloradov M. 2013. BTEX in the Exhaust Emissions of Motor Vehicles. In: *Causes, Impacts and Solutions to Global Warming*, ed. Dincer I, Colpan C.O, Kadioglu F., ch 21, 333-343. USA: Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- Amr I, Bari S. 2009. A comparison between EGR and lean-burn strategies employed in a natural gas SI engine using a two-zone combustion model. *Energy Conversion and Management* 50: 3129-3139
- Arnold G.L, Kirby R.S, Langendoerfer S, Wilkins-Haug L. 1994. Toluene embryopathy- Clinical delineation and developmental follow-up. *Pediatrics* 93(2): 216-20.
- Atkinson R, Carter W.P.L. 1984. Kinetics and mechanisms of the gas-phase reactions of ozone with organic compounds under atmospheric conditions. *Chemical Reviews* 84: 437-470.
- Atkinson R. 1990. Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds. *Atmospheric Environment* 24A(1): 1-41.
- ATSDR 1994. Toxicological profile for toluene, Agency for Toxic Substances and Disease Registry TP-93/14.
- Barlow J.T, Latham S, Mc Crae S.I, Boulter G.P. 2009. A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. Transport Research Laboratory, UK.
- Barregard L, Holmberg E, Sallsten G. 2009. Leukaemia incidence in people living close to an oil refinery. *Environmental Research* 109 (8): 985-990.
- Barth M, Feng A, Younglove T, Scora G, Levine C, Ross M, Wenzel T. 2000. Development of a comprehensive modal emissions model- Final report, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Departments of Transportation USA.
- Bolton J.L, Trush M.A, Penning T.M, Dryhurst G, Monks T.J. 2000. Role of quinones in toxicology. *Chemical Research in Toxicology* 13: 135-166.
- Bond A.E, Thompson V.L, Ortman G.C. 1986. Self service station vehicle refueling exposure study. In *Proc. EPA/APCA symposium on measurements of toxic air pollutants*, Environmental Protection Agency. Air Pollution Control Association, EPA600986013, 458-466. Raleigh, NC, USA
- Bryce-Smith D, Gilbert A. 1976. The organic photochemistry of benzene. *Tetrahedron* 32:1309-1326.
- Buczynskaa A.J, Krataa A, Strangera M, Locateli Godoib A.F, Kontozova-Deutscha V, Bencsa L, Naveaud I, Roekensd E, Van Griekena R. 2009. Atmospheric BTEX-concentrations in an area with intensive street traffic. *Atmospheric Environment* 43(2): 311-318.

- Chiou C.T, Porter P.E, Schmedding D.W. 1983. Partition equilibria of nonionic organic compounds between soil organic matter and water. *Environmental Science and Technology* 17: 227-231.
- Ciarrocca M, Tomei G, Fiaschetti M, Caciari T, Cetica C, Andreozzi G, Capozzella A, Schifano P. M, Andre C. J, Tomei F, Sancini A. 2012. Assessment of occupational exposure to benzene, toluene and xylenes in urban and rural female workers. *Chemosphere* 87(7): 813-819.
- Collins C.D, Bell J.N.B, Crews C. 2000. Benzene accumulation in horticultural crops, *Chemosphere* 40(1): 109-114.
- Colls J. 2002. *Air pollution* 2nd edition. Spon Press, London, England.
- Čokorilo V. 2009. *Rudarske mašine*, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Srbija.
- Davis D.D, Heaps W, Philen D. 1979. Boundary layer measurements of the OH radical in the vicinity of an isolated power plant plume: SO₂ and NO₂ chemical conversion times. *Atmospheric Environment* 13: 1197-1203.
- Dorić J. 2012. Unapređenje efektivnosti motora SUS primenom nekonvencionalnog klipnog mehanizma. Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.
- Duarte-Davidson R, Courage C, Rushton L, Levy L. 2001. Benzene in the environment: an assessment of the potential risks to the health of the population. *Occupational and Environmental Medicine* 58: 2-13.
- Đorđević N, Jovanić P. 2007. Mehanohemijaska aktivacija sistema 2MgO·2Al₂O₃·5SiO₂. *Hemijska industrija* 61 (5a): 307-312.
- Egeghy P.P, Tornero-Velez R, Rappaport S.M. 2000. Environmental and biological monitoring of benzene during self-service automobile refueling. *Environmental Health Perspectives* 108(12): 1195-1202.
- EPA. 1982. Aquatic fate process data for organic priority pollutants. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Regulations and Standards, Monitoring and Data Support Division, EPA440481014
- EPA. 1977. List of pollutants and applicability of part 61. National emission standards for hazardous air pollutants. U.S. Environmental Protection Agency. Code of Federal Regulations. 40 CFR 61.01.
- EPA. 1991. Environmental factors affecting toluene degradation in ground water at a hazardous waste site. Athens, GA: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. PB91-182246. EPA/600/J-91/037.
- Esteve-Turrillas A.F, Pastor A, de la Guardia M. 2007. Assessing air quality inside vehicles and at filling stations by monitoring benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes with the use of semipermeable devices. *Analytica Chimica Acta* 593: 108-116.
- Eveleth T.W. 1990. Basic and intermediate chemicals. In: *Kline guide to the US chemical industry* 5th, ed. Eveleth T.W., ch 2, 1-42. USA: Fairfield Kline & Company, Inc.

- Fan A, Alexeeff G. 1999. Public Health Goal for Toluene In Drinking Water. Office of Environmental Health Hazard Assessment California Environmental Protection Agency, USA.
- Filipović I. 2006. Motori i motorna vozila, Mašinski fakultet Univerziteta u Tuzli, Tuzla, BiH.
- Flagan C.R, Seinfeld H.J. 1988. Fundamentals of air pollution engineering. California Institute of Technology, Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Garcia J.P, Beyne-Masclat S, Mouvier G. 1992. Emissions of volatile organic compounds by coal-fired power stations, Atmospheric Environment 26A(9): 1589-1597.
- Gong C, Huang K, Deng B, Liu X. 2011. Catalyst light-off behavior of a spark-ignition LPG (liquefied petroleum gas) engine during cold start. Energy 36: 53-59.
- Gospe S.M Jr, Al-Bayati M.A.S. 1994. Comparison of oral and inhalation exposures to toluene. Journal of the American College of Toxicology 13(1): 21-32.
- Gossett R.W, Brown D.A, Young D.R. 1983. Predicting the bioaccumulation of organic compounds in marine organisms using octanol/water partition coefficients. Marine Poll Bull 14(10): 387-392.
- Guzzella L, Sciarretta A. 2013. Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization. Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- Hansch C, Leo A, Hoekman D. 1995. Xylene. Exploring QSAR hydrophobic, electronic, and steric constants. American Chemical Society, Washington DC, USA.
- Hansch C, Leo A. 1979. Substituent constants for correlation analysis in chemistry and biology. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Hasan O.A, Leung P, Tsolakis A, Golunski E.S, Xu M.H, Wyszynski L.M, Richardson S. 2011. Effect of composite aftertreatment catalyst on alkane, alkene and monocyclic aromatic emissions from an HCCI/SI gasoline engine Fuel 90:1457-1464.
- Hattemer-Frey H.A, Travis C.C, Land M.L. 1990. Benzene- Environmental partitioning and human exposure. Environmental Research 53: 221-232.
- He M, Zhang X, Zeng K, Gao K. 2011. A combined thermodynamic cycle used for waste heat recovery of internal combustion engine. Energy 36: 6821-6829.
- Heywood J. 1988. Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill, New York.
- Hoeben W, Beckers F, Pemen A, van Heesch E, Kling W. 2012. Oxidative degradation of toluene and limonene in air by pulsed corona technology. Journal of Physics D, Applied Physics 45(5): 1-14.
- Hoffmann K, Krause C, Seifert B. 2000. The German Environmental Survey 1990/92 (GERES II) Sources of Personal exposure to volatile organic compounds. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology 10: 115-125.
- Howard P.H, Boethling R.S, Jarvis W.F. 1991. Handbook of environmental degradation rates. Lewis Publishers, Inc. Fort Worth, Texas, USA

- Howard P.H. 1990. Handbook of environmental fate and exposure data for organic chemicals. Vol. II. Solvents. Lewis Publishers, Inc. Fort Worth, Texas, USA
- HSDB. 2005. Benzene. Hazardous Substances Data Bank, National Library of Medicine, <http://toxnet.nlm.nih.gov>
- <http://ec.europa.eu/environment/archives/autooil/index.html> (May 24, 2014)
- <http://www.unece.org/trans/main/welcwp29.html> (April 22, 2014)
- Hunter Mack J, Rapp H.V, Broeckelmann M, Soon Lee T, Dibble W.R. 2014. Investigation of biofuels from microorganism metabolism for use as anti-knock additives. *Fuel* 117: 939-943.
- Jain K. A. 1997. Basic theory of magnets. In Proc. CERN Accelerator School on Measurement and Alignment of Accelerator and Detector Magnets, 1-26. Anacapri, Italy, 11-17 April.
- Kaiser W.E., Siegl O.W, Henig I.Y, Anderson W.R, Trinker H.F. 1991. Effect of fuel structure on emissions from a spark-ignited engine. *Environ Sci Technol* 25: 2005–2012.
- Karakitsios P.S, Papaloukas C.L., Kassomenos A.P, Pilidis A.G. 2007. Assessment and prediction of exposure to benzene of filling station employees. *Atmospheric Environment* 41: 9555-9569.
- Karickhoff S.W. 1981. Semi-empirical estimation of sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments and soils. *Chemosphere* 10: 833-846.
- Kelly J.T, Callahan J.P, Pleil J, Evans F.G. 1993. Method development and field measurements for polar volatile organic compounds in ambient air. *Environmental Science and Technology* 27(6): 1146-1153.
- Khalil M.A, Rasmussen R.A. 1992. Forest hydrocarbon emissions. Relationships between fluxes and ambient concentrations. *Journal of the Air and Waste Management Association* 42(6): 810-813.
- Khillare P.S, Hoque R.R, Shridhar V, Agarwal T, Balachandran S. 2008. Temporal variability of benzene concentration in the ambient air of Delhi: A comparative assessment of pre- and post-CNG periods. *Journal of Hazardous Materials* 154: 1013-1018.
- Kington I A., Davis F. R. 1991. *Engineer Materials Handbook, vol. 2. „Ceramics“* edited by S. J. Schneider, Jr., ASM International Metals Park, OH, p 1191,
- Lin T.F, Little J.C, Nazaroff W.W. 1994. Transport and sorption of volatile organic compounds and water vapor within dry soil grains. *Environmental Science and Technology* 28: 322-330.
- Llop S, Ballester F, Estarlich M, Esplugues A, Rebagliato M, Iniguez C. 2010. Preterm birth and exposure to air pollutants during pregnancy. *Environmental Research* 110: 778–785.
- Lyman W.J, Reehl W.F., Rosenblatt D.H. 1982. *Handbook of chemical property estimation methods: Environmental behavior of organic compounds*. McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- Mackay D, Leinonen P.J. 1975. Rate of evaporation of low-solubility contaminants from water bodies to atmosphere. *Environmental Science and Technology* 9: 1178-1180.

- MacLeod M, Mackay D. 1999. An assessment of the environmental fate and exposure of benzene and the chlorobenzenes in Canada. *Chemosphere* 38(8): 1777-1796.
- Mehlman M.A. 2002. Carcinogenic effects of Benzene: Cesare Maltoni's contributions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 982 (1): 137-148
- Merker G, Schwarz C, Stiesch G, Otto F. 2006. *Simulating Combustion*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Millo F, Luisi S, Borean F, Stroppiana A. 2014. Numerical and experimental investigation on combustion characteristics of a spark ignition engine with an early intake valve closing load control *Fuel* 121: 298-310.
- Nojima K, Fukaya K, Fukui S. 1975. Studies on photochemistry of aromatic hydrocarbons: The formation of nitrophenols and nitrobenzene by the photochemical reaction of benzene in the presence of nitrogen monoxide. *Chemosphere* 2:77-82.
- O'Brien R.J, Holmes J.R, Bockian A.H. 1975. Formation of photochemical aerosol from hydrocarbons chemical reactivity and products. *Environmental Science and Technology* 9: 568-576.
- Pacheco F. A, Martins E.S. M, Zhao H. 2013. New European Drive Cycle (NEDC) simulation of a passenger car with a HCCI engine: Emissions and fuel consumption results. *Fuel* 111: 733-739.
- Papić i dr. 2010. Određivanje količina emitovanih gasovitih zagađujućih materija poreklom od drumskog saobraćaja primenom COPERT IV modela evropske agencije za zaštitu životne sredine. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Srbija.
- Pate C.T, Atkinson R, Pitts J.N. Jr 1976. The gas phase reaction of O₃ with a series of aromatic hydrocarbons. *Journal of Environmental Science and Health AII*: 1-10.
- Pejin D. 2007. Benzen najznačajniji činilac leukemogeneze. In Proc. Ekološka odgovornost, opasne materije i hemikalije, bezbednost na radu i rizici, 68-70. Igalo, 19-21 septembra.
- Petrović M. 1988. Ispitivanje električnih mašina, Naučna knjiga, Beograd, Srbija.
- Photovac 1997. *Voyager users manual*, by PE Photovac, Waltham, Massachusetts, USA.
- Pyykko K, Tahti H, Vapaatalo H. 1977. Toluene concentrations in various tissues of rats after inhalation and oral administration. *Archives of Toxicology* 38: 169-176.
- Qu X, Zhang Q, Wang W. 2006. Degradation mechanism of benzene by NO₃ radicals in the atmosphere: A DFT study. *Chemical Physics Letters* 426: 13-19.
- Ra Y, Reitz D.R. 2011. A combustion model for IC engine combustion simulations with multi-component fuels *Combustion and Flame* 158: 69-90.
- Ravishankara A.R, Wagner S, Fischer S. 1978. A kinetics study of the reactions of hydroxyl with several aromatic and olefinic compounds, *International Journal of Chemical Kinetics* 10: 783-804.
- Riveles K, Roza R, Talbot P. 2005. Phenols, quinolines, indoles, benzene, and 2-cyclopenten-1-ones are oviductal toxicants in cigarette smoke. *Toxicol. Sci.*, 86: 141-151

- Salazar F. 1998. Internal Combustion Engines. Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame, Notre Dame IN, USA.
- Sardarmehni T, Keighobadi J, Menhaj B. M, Rahmani H. 2013. Robust predictive control of lambda in internal combustion engines using neural networks. Archives of Civil and Mechanical Engineering 13: 432-443.
- Schuetzle D, Siegl O.W, Jensen E.T, Dearth A.M, Kaiser W.E, Gorse R, Kreucher W, Kulik E. 1994. The relationship between gasoline composition and vehicle hydrocarbon emissions: a review of current studies and future research needs. Environmental Health Perspectives 102: 3-12.
- Stefanović A. 2010. Drumska vozila. Centar za motore i motorna vozila Mašinskog fakulteta u Nišu i Centar za bezbednost saobraćaja Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, Niš, Srbija.
- Stojić B. 2009. Teorija kretanja drumskih vozila- uputstvo za izradu vučnog proračuna. Skripta. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija.
- U.S. Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2007. Draft toxicological profile for xylene
- U.S. Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2005. Draft toxicological profile for benzene, USA.
- Uchrin C.G, Mangels G. 1987. Sorption equilibria of benzene and toluene on two New Jersey coastal plain ground water aquifer solids. Journal of Environmental Science and Health 22(A): 743-758.
- Vowles P.D, Mantoura R.F.C. 1987. Sediment-water partition coefficients and HPLC retention factors of aromatic hydrocarbons. Chemosphere 16: 109-116.
- Vojinović-Miloradov M., Adamović D. 2013. Gaseous Hazardous and Emerging Substances in Urban Areas. In Proc.Towards a humane city, 33-38. Novi Sad, 24-25 October.
- Vukmirovic Z. 2007. Prilog boljem poznavanju zagađivanja vazduha benzenom. Hemijski preglad 48: 36-41.
- Wallace L.A, Pellizzari E.D, Hartwell T.D, Whitmore R, Sparacino C, Zelon H. 1986. Total exposure assessment methodology (TEAM) Study: personal exposures, indoor-outdoor relationships, and breath levels of volatile organic compounds in New Jersey. Environment International 12, 369-387.
- Wallace L.A. 1989. Major sources of benzene exposure. Environmental Health Perspectives 82: 165-169.
- Wallace L.A. 1995. Human exposure to environmental pollutants, a decade of experience. Clinical and Experimental Allergy 25: 4-9.
- Wei K.S, Adelman A.H. 1969. The photooxidation of toluene: The role of an excited charge transfer complex. Tetrahedron Letters 38: 3297-3300.
- Westbrook C.K, Dryer F.L. 1981. Simplified Reaction Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames. Combust Sci Tech 27: 31-43.

- Yanagihara S, Shimada I, Shinoyama E. 1977. Photochemical reactivities of hydrocarbons. In Proc: Proceedings of the 4th International Clean Air Congress. Japanese Union of Air Pollution Prevention Associations, 472-477. Tokyo
- Zervas E, Montagne X, Lahaye J. 2004. Influence of fuel and air/fuel equivalence ratio on the emission of hydrocarbons from a SI engine. 1. Experimental findings. Fuel 83: 2301-2311
- Zhang G, Ye L, Wang J, Ren J, Xu X, Feng N, Zhou L, Ru J, Hao Y, Tian W, Sun P, Au W, Christiani C. D, Xia Z. 2014. Effect of polymorphic metabolizing genes on micronucleus frequencies among benzene-exposed shoe workers in China. International Journal of Hygiene and Environmental Health 217 (7): 726-732.

PRILOG I

Europremium

Koncentracioni nivoi BTEX jedinjenja pri različitim vrednostima opterećenja eksperimentalnog motora (ξ), koeficijenta viška vazduha (λ) i broja obrtaja eksperimentalnog motora (n) za gorivo Europremium.

Opterećenje 10%

$\lambda=0,85$ i $n=2000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	27,91	70,30	18,80	62,40	23,14
2	27,53	68,30	14,50	62,80	20,20
3	28,368	60,19	16,20	69,86	19,03
4	28,955	74,01	16,60	62,14	14,10
5	28,735	73,2	15,90	54,8	19,03

$\lambda=1$ i $n=2000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	22,35	38,80	9,68	34,30	10,80
2	22,45	37,30	10,51	33,20	9,80
3	22,10	35,40	8,70	31,50	10,50
4	22,70	40,20	8,30	28,00	8,800
5	22,40	37,80	7,80	29,00	10,6

$\lambda=1,15$ i $n=2000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	8,39	15,90	5,30	14,89	4,57
2	10,9	20,30	3,20	15,85	4,89
3	9,59	22,60	7,41	15,95	5,95
4	10,32	16,80	5,33	16,94	5,87
5	9,57	16,90	6,65	14,38	6,36

$\lambda=0,85$ i $n=2500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	36,80	88,90	14,10	58,30	16,10
2	37,60	80,20	13,90	60,60	15,40
3	34,30	80,40	13,80	65,93	15,80
4	33,25	75,40	13,00	61,87	16,50
5	35,55	81,60	14,70	61,80	16,20

 $\lambda=1$ i $n=2500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	23,93	51,00	7,92	30,00	9,30
2	26,48	39,50	8,20	26,02	9,20
3	25,24	42,70	7,66	25,58	9,00
4	24,88	41,80	7,90	22,20	8,41
5	24,47	39,00	8,08	26,20	9,09

 $\lambda=1,15$ i $n=2500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	8,12	19,90	5,92	14,70	5,23
2	8,93	16,65	4,98	14,30	4,34
3	7,46	14,37	4,35	15,90	4,36
4	7,23	15,88	5,50	14,20	6,22
5	7,93	16,20	4,96	13,90	6,68

 $\lambda=0,85$ i $n=3000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	42,34	89,41	12,80	60,30	15,80
2	34,22	99,58	13,44	51,15	14,90
3	29,00	96,32	14,50	35,51	15,20
4	36,29	85,10	14,02	52,00	21,08
5	39,15	88,59	14,24	51,04	9,02

$\lambda=1$ i $n=3000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	31,20	35,14	8,35	29,32	9,93
2	30,25	38,11	5,25	25,86	8,52
3	20,50	41,25	10,16	35,44	9,41
4	23,75	33,20	14,00	28,90	7,98
5	21,80	36,80	3,38	20,48	8,65

 $\lambda=1,15$ i $n=3000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	6,92	5,24	1,48	9,22	2,11
2	4,77	8,14	2,58	6,32	2,13
3	4,88	7,18	2,84	4,52	4,17
4	5,65	9,12	3,12	4,32	2,21
5	5,92	12,06	2,77	5,52	0,90

 $\lambda=0,85$ i $n=3500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	55,42	116,87	6,47	14,24	13,50
2	47,89	102,89	8,76	21,21	13,94
3	46,20	101,69	9,36	23,21	11,76
4	37,69	89,38	11,32	19,04	7,54
5	46,80	99,17	8,86	18,30	21,76

 $\lambda=1$ i $n=3500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	32,46	28,35	5,83	17,37	4,51
2	33,52	35,48	5,35	16,20	5,84
3	24,64	36,38	5,95	13,10	9,82
4	33,20	37,09	6,14	29,30	6,39
5	32,18	34,20	6,11	21,53	6,72

$\lambda=1,15$ i $n=3500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	5,18	7,75	1,29	3,22	0,55
2	4,02	6,44	1,63	4,22	0,98
3	4,13	6,24	3,85	3,36	3,22
4	5,10	5,96	1,96	6,04	1,96
5	2,72	5,54	0,94	7,28	2,56

Opterećenje 30% $\lambda=0,85$ i $n=2000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	25,50	63,70	15,51	54,30	18,23
2	24,30	67,40	14,84	59,60	21,12
3	24,70	70,19	11,70	44,30	14,22
4	21,70	74,30	17,30	55,03	13,19
5	28,30	75,41	15,15	62,41	18,25

 $\lambda=1$ i $n=2000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	19,45	45,43	12,45	38,04	12,20
2	17,40	47,57	13,20	39,49	12,72
3	14,16	49,29	11,05	31,01	18,30
4	21,32	53,15	10,32	38,42	11,90
5	16,17	43,06	8,98	43,54	7,38

 $\lambda=1,15$ i $n=2000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	12,82	19,44	5,63	8,68	5,92
2	11,80	16,13	4,76	9,84	3,21
3	14,20	20,20	3,28	11,44	5,42
4	9,03	22,15	4,97	16,73	5,88
5	13,15	14,58	7,13	11,81	5,26

$\lambda=0,85$ i $n=2500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	23,22	69,38	15,17	47,94	17,07
2	23,64	64,53	14,23	49,59	18,23
3	31,02	62,07	14,86	51,88	13,34
4	26,34	65,20	11,12	56,77	16,13
5	19,78	59,42	18,12	53,32	20,23

 $\lambda=1$ i $n=2500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	19,23	34,35	3,39	31,27	11,35
2	22,28	37,22	11,34	25,35	8,32
3	18,46	41,42	8,43	28,25	9,16
4	18,20	38,25	8,99	28,73	10,72
5	14,33	39,26	8,23	27,40	7,33

 $\lambda=1,15$ i $n=2500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	9,63	11,35	6,14	13,23	5,01
2	9,82	12,49	5,25	14,12	3,23
3	7,95	15,43	4,34	16,44	6,24
4	8,75	17,44	4,18	12,06	3,01
5	12,22	21,30	3,06	10,15	4,22

 $\lambda=0,85$ i $n=3000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	30,42	68,20	17,20	47,68	18,11
2	22,14	70,34	14,82	49,12	14,81
3	23,94	56,86	13,22	50,31	12,78
4	25,81	62,03	11,28	48,10	16,86
5	24,69	64,07	15,47	51,29	16,93

$\lambda=1$ i $n=3000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	22,50	36,42	9,68	24,23	7,34
2	14,23	33,87	8,44	24,11	9,34
3	17,42	40,28	7,64	27,12	8,44
4	23,02	35,19	8,12	22,26	9,03
5	19,33	37,24	7,14	27,78	8,33

 $\lambda=1,15$ i $n=3000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	9,14	12,31	4,13	7,94	5,45
2	9,55	14,83	3,13	9,10	3,01
3	7,22	15,01	2,45	10,20	1,73
4	8,24	12,33	3,28	7,03	3,92
5	14,23	9,02	5,10	8,34	2,35

 $\lambda=0,85$ i $n=3500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	32,18	71,26	14,41	35,19	11,62
2	31,22	61,23	13,45	39,29	12,86
3	27,31	54,52	10,19	42,39	16,70
4	24,38	46,67	11,18	38,22	13,64
5	26,41	58,32	12,28	44,41	14,68

 $\lambda=1$ i $n=3500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	26,75	32,90	4,95	17,43	4,20
2	23,45	28,46	5,86	18,22	5,43
3	21,25	28,20	3,88	19,29	6,35
4	24,72	25,37	3,79	15,31	5,38
5	24,82	24,57	6,42	14,75	5,27

$\lambda=1,15$ i $n=3500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	8,23	7,85	0,74	3,19	0,63
2	6,33	6,36	1,24	5,54	1,60
3	5,84	5,89	3,34	3,04	2,03
4	6,64	10,26	2,90	7,36	2,98
5	7,14	7,22	2,50	4,99	2,22

Opterećenje 50%

 $\lambda=0,85$ i $n=3000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	28,90	67,21	14,32	54,92	12,29
2	23,40	62,67	15,31	52,05	14,48
3	24,30	55,78	12,21	47,26	11,95
4	32,60	64,22	18,13	41,04	18,38
5	28,30	67,11	15,04	45,21	20,40

 $\lambda=1$ i $n=3000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	20,91	31,82	8,51	25,20	7,34
2	20,81	35,85	7,80	21,30	6,93
3	24,39	36,79	9,33	24,50	9,44
4	19,18	37,43	5,23	26,70	8,22
5	17,71	38,61	12,34	22,30	9,15

 $\lambda=1,15$ i $n=3000$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	12,33	19,03	5,66	17,30	3,65
2	8,86	18,19	4,34	10,20	4,43
3	11,34	14,25	4,88	9,20	5,23
4	12,33	16,25	6,34	12,50	4,33
5	10,63	17,28	3,32	11,30	4,75

$\lambda=0,85$ i $n=3500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	19,23	36,60	9,43	26,24	7,02
2	21,30	32,30	9,23	21,72	8,15
3	17,42	31,29	6,13	19,88	6,33
4	17,88	35,12	7,93	22,45	9,33
5	17,17	36,19	8,28	21,21	8,11

 $\lambda=1$ i $n=3500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	18,24	26,31	8,36	19,20	6,33
2	19,43	22,22	6,23	16,89	5,43
3	14,23	28,12	7,23	18,47	8,43
4	16,45	31,32	6,13	13,11	7,69
5	17,25	28,22	8,35	14,33	7,38

 $\lambda=1,15$ i $n=3500$ o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	9,33	11,28	1,72	6,64	1,05
2	10,11	10,22	2,83	8,42	2,73
3	8,30	13,51	2,96	7,32	2,42
4	12,26	7,07	3,43	5,21	3,58
5	8,66	12,93	3,93	4,59	2,18

PRILOG II

NIS benzin

Koncentracioni nivoi BTEX jedinjenja pri različitim vrednostima opterećenja eksperimentalnog motora (ξ), koeficijenta viška vazduha (λ) i broja obrtaja eksperimentalnog motora (rpm) za NIS benzin.

Opterećenje 10%

$\lambda=0,85$ i rpm=2000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	47,42	84,90	11,42	56,42	15,17
2	43,38	76,80	9,21	53,61	14,36
3	36,45	82,30	7,34	55,68	12,60
4	42,32	80,60	12,35	53,91	17,34
5	37,43	78,40	10,18	49,37	14,03

$\lambda=1$ i rpm=2000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	18,83	35,26	8,21	24,88	4,48
2	22,94	38,79	5,43	25,43	7,47
3	25,87	44,64	6,28	28,79	8,41
4	24,63	41,30	6,15	25,60	11,73
5	25,73	48,01	4,71	21,30	5,81

$\lambda=1,15$ i rpm=2000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	18,02	22,78	2,83	15,09	5,18
2	11,17	20,68	3,86	11,42	4,47
3	13,13	12,47	3,51	12,29	1,83
4	14,67	14,65	4,16	9,37	5,54
5	14,01	11,42	2,32	12,34	3,28

$\lambda=0,85$ i rpm=2500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	54,82	96,21	11,12	60,10	19,20
2	46,24	85,11	8,36	55,40	14,14
3	47,66	89,11	9,24	47,30	12,19
4	40,74	92,30	9,24	51,59	11,27
5	45,54	91,26	8,84	50,11	13,19

 $\lambda=1$ i rpm=2500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	26,30	34,14	6,72	25,55	5,22
2	28,40	36,85	5,02	26,11	6,94
3	29,85	38,72	4,87	30,71	7,84
4	30,56	42,81	6,58	21,41	9,01
5	28,89	40,98	5,37	23,22	8,04

 $\lambda=1,15$ i rpm=2500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	12,31	12,20	3,11	12,29	3,33
2	12,13	14,30	4,84	11,12	2,88
3	7,22	15,20	1,78	9,11	3,65
4	12,52	16,57	2,83	8,72	4,94
5	16,31	17,23	2,35	10,26	2,35

 $\lambda=0,85$ i rpm=3000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	48,34	102,75	9,75	55,30	14,54
2	49,75	97,29	8,49	49,13	13,65
3	42,43	87,21	6,32	48,13	12,71
4	51,32	91,44	7,73	46,68	13,73
5	57,66	96,31	8,32	49,77	11,37

$\lambda=1$ i rpm=3000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	32,31	27,19	3,25	18,13	5,21
2	35,94	31,34	5,24	19,63	3,72
3	21,80	32,00	3,95	14,42	5,36
4	23,37	35,32	4,78	17,76	6,73
5	26,58	30,15	4,43	17,08	5,64

 $\lambda=1,15$ i rpm=3000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	7,54	10,23	2,32	10,24	2,11
2	9,43	13,88	1,97	5,24	2,53
3	11,82	14,43	0,65	8,39	2,95
4	13,84	14,90	4,74	13,00	3,88
5	11,86	18,07	2,32	9,13	2,74

 $\lambda=0,85$ i rpm=3500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	48,39	112,52	4,42	44,50	11,29
2	56,19	105,61	7,74	47,30	14,14
3	57,37	95,74	8,42	55,32	13,20
4	62,25	98,92	7,02	49,15	15,47
5	60,31	102,21	7,96	50,74	11,90

 $\lambda=1$ i rpm=3500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	37,40	28,62	3,99	15,63	5,51
2	31,30	23,92	5,86	14,43	4,70
3	31,32	27,66	2,91	17,93	3,63
4	29,44	30,57	3,01	18,87	7,87
5	26,54	33,73	3,52	21,14	4,79

$\lambda=1,15$ i rpm=3500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	6,31	10,23	0,96	9,72	1,81
2	14,78	12,57	1,78	8,72	2,71
3	11,56	14,20	2,72	7,33	3,92
4	9,32	15,60	2,72	4,13	0,90
5	8,52	14,01	0,82	7,10	2,80

Opterećenje 30% $\lambda=0,85$ i rpm=2000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	29,30	55,70	10,34	57,16	11,20
2	31,61	50,63	11,32	46,31	12,21
3	32,52	48,42	7,14	47,43	10,13
4	33,86	49,02	8,02	41,98	9,60
5	32,70	52,23	7,87	48,62	9,86

 $\lambda=1$ i rpm=2000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	20,70	44,20	5,75	30,00	6,83
2	22,83	43,46	4,62	26,01	7,64
3	23,31	42,78	7,12	23,10	6,79
4	18,60	43,01	6,31	27,82	7,99
5	20,56	44,55	6,85	24,07	8,74

 $\lambda=1,15$ i rpm=2000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	12,72	19,21	5,72	9,83	5,11
2	15,15	20,40	3,68	13,88	4,24
3	14,82	15,55	2,23	15,87	4,68
4	16,51	19,10	2,95	11,48	2,13
5	15,29	17,24	3,34	12,94	6,31

$\lambda=0,85$ i rpm=2500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	37,14	55,68	8,91	38,71	8,34
2	31,20	57,25	6,46	36,32	8,74
3	35,04	54,24	7,62	42,27	9,70
4	33,21	50,20	7,23	36,10	10,84
5	29,91	53,14	6,27	29,60	11,78

 $\lambda=1$ i rpm=2500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	21,23	33,37	3,61	22,40	7,63
2	22,42	30,21	4,25	25,30	5,54
3	23,50	27,15	4,82	20,03	6,21
4	19,34	33,21	4,71	20,56	6,77
5	27,52	32,06	3,55	14,21	5,87

 $\lambda=1,15$ i rpm=2500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	10,74	12,16	2,34	6,33	3,55
2	11,93	14,33	2,14	8,43	4,01
3	12,72	15,31	4,02	9,33	2,01
4	9,63	12,39	3,02	7,88	2,41
5	13,98	11,35	0,14	8,91	2,88

 $\lambda=0,85$ i rpm=3000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	35,78	58,20	3,84	35,47	10,47
2	36,82	54,29	5,47	28,23	10,11
3	44,34	52,10	9,03	36,10	9,43
4	34,94	56,40	7,83	38,12	8,32
5	37,62	67,51	6,88	33,08	9,19

$\lambda=1$ i rpm=3000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	29,20	24,63	5,32	19,31	6,06
2	31,30	27,84	4,44	18,02	7,38
3	27,40	28,901	3,85	18,34	4,21
4	28,50	29,58	4,33	15,51	6,24
5	27,10	32,55	4,97	22,31	4,01

 $\lambda=1,15$ i rpm=3000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	12,14	8,57	0,87	6,73	1,88
2	10,23	9,21	1,93	5,44	2,10
3	11,80	10,53	1,53	4,92	2,67
4	11,32	11,40	0,85	8,67	0,45
5	11,01	9,00	2,88	8,64	3,07

 $\lambda=0,85$ i rpm=3500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	35,95	79,20	5,94	33,61	9,01
2	37,62	76,64	6,33	31,43	10,11
3	35,71	78,50	6,31	36,89	8,12
4	40,82	69,76	7,58	32,84	6,01
5	42,90	74,90	7,25	34,74	7,10

 $\lambda=1$ i rpm=3500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	34,10	28,53	5,33	11,06	2,91
2	32,30	31,76	4,76	12,24	3,59
3	28,57	29,87	3,54	16,34	4,38
4	30,35	33,72	2,68	14,26	5,61
5	29,18	35,62	2,30	17,10	4,97

$\lambda=1,15$ i rpm=3500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	10,33	9,99	2,55	4,34	2,42
2	11,28	5,83	1,03	5,33	1,93
3	7,90	4,87	0,65	3,12	0,43
4	8,57	6,54	0,44	2,57	0,57
5	9,28	7,58	1,40	4,78	0,57

Opterećenje 50%

 $\lambda=0,85$ i rpm=3000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	35,80	57,80	9,37	34,72	7,04
2	28,41	60,70	5,13	38,63	8,21
3	31,12	55,30	7,31	31,88	7,34
4	32,38	48,13	6,33	27,61	9,51
5	28,90	57,20	7,01	33,52	8,47

 $\lambda=1$ i rpm=3000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	25,12	21,40	3,17	19,33	6,33
2	27,30	25,80	5,15	12,83	9,13
3	20,20	26,20	3,07	14,55	5,32
4	24,16	29,12	4,31	15,94	4,21
5	23,50	27,34	4,88	17,90	6,08

 $\lambda=1,15$ i rpm=3000 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	17,20	7,84	0,28	8,92	1,32
2	14,10	8,98	2,97	7,43	0,52
3	12,50	11,71	1,81	6,51	2,12
4	11,80	5,18	0,98	5,33	2,98
5	12,20	7,99	2,42	7,32	1,11

$\lambda=0,85$ i rpm=3500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	27,21	39,70	2,94	25,12	3,65
2	21,50	43,10	4,78	29,14	5,11
3	25,80	44,50	4,98	32,77	7,84
4	34,30	40,87	8,12	33,89	8,11
5	32,07	42,14	5,04	32,14	7,34

 $\lambda=1$ i rpm=3500 o/min

Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	24,20	27,11	4,33	15,43	4,13
2	19,30	23,87	1,98	17,20	3,87
3	20,70	30,03	5,12	13,60	3,10
4	21,80	24,10	3,87	11,10	2,85
5	18,30	20,87	3,04	16,50	4,25

 $\lambda=1,15$ i rpm=3500 o/min

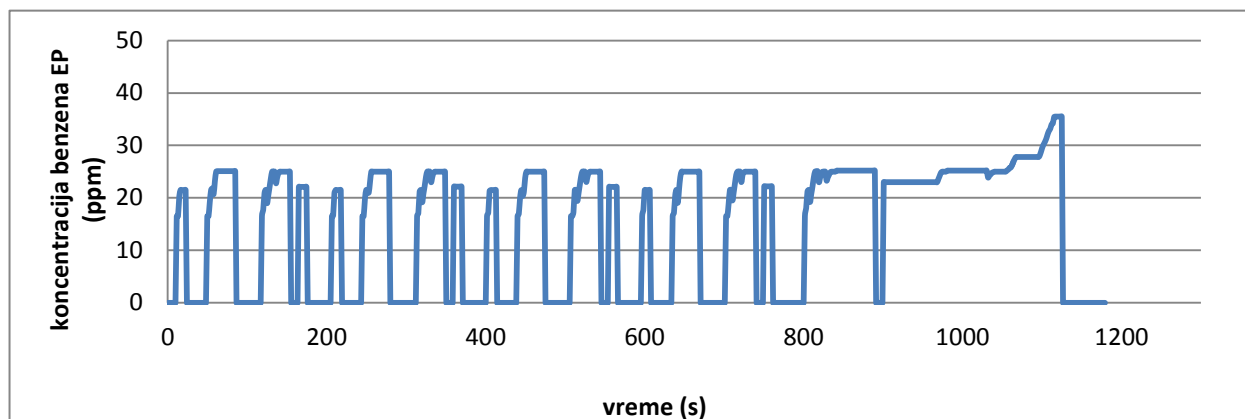
Broj merenja	Benzen [ppm]	Toluen [ppm]	Etilbenzen [ppm]	m,p-ksilen [ppm]	o-ksilen [ppm]
1	5,71	3,27	1,09	2,84	1,12
2	8,33	4,33	0,12	3,90	0,22
3	8,15	5,23	1,55	1,12	0,76
4	5,91	6,31	0,76	2,87	0,34
5	7,11	6,79	1,11	4,14	0,99

PRILOG III

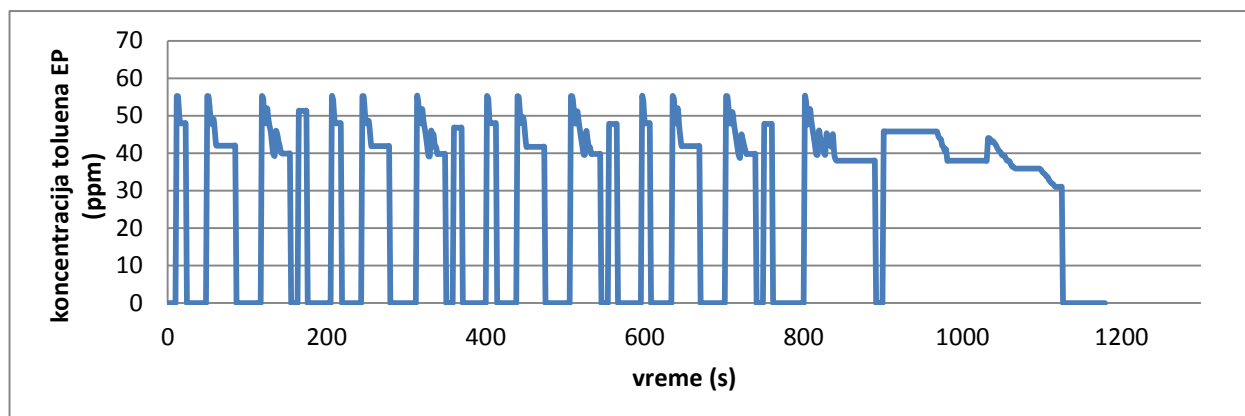
Europremium

Promene koncentracijonih nivoa i mase emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC, pri korišćenju Europremium benzina kao pogonskog goriva.

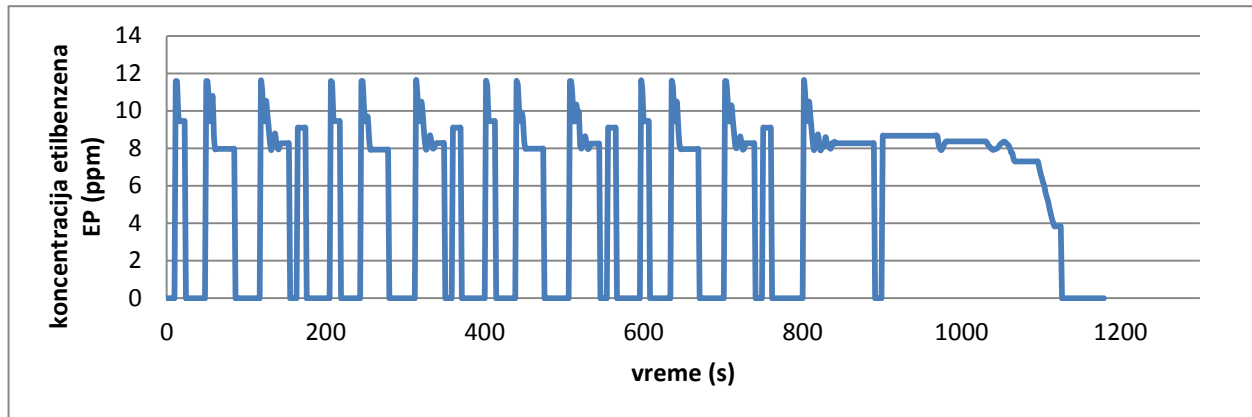
Promene koncentracijonih nivoa BTEX jedinjenja tokom NEDC



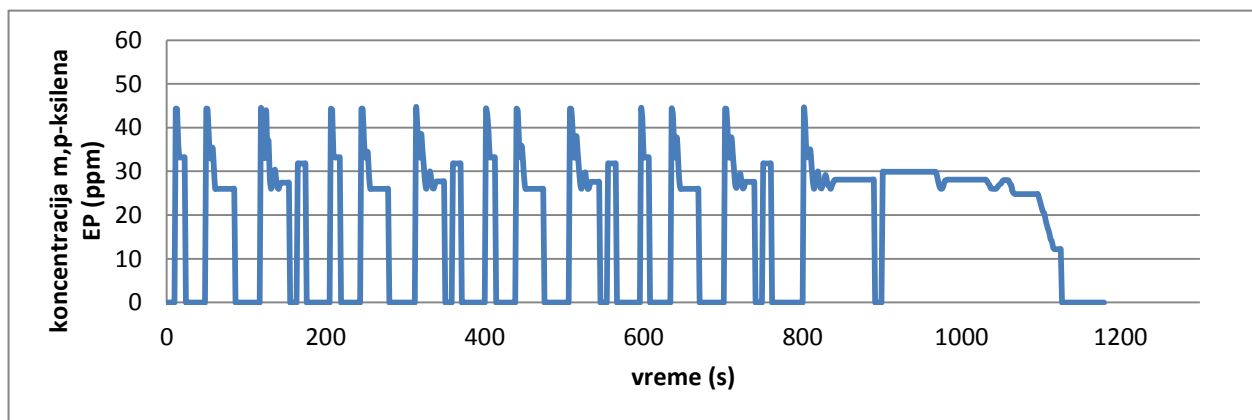
Grafik 1. Zavisnost koncentracije emitovanog benzena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo Europremium.



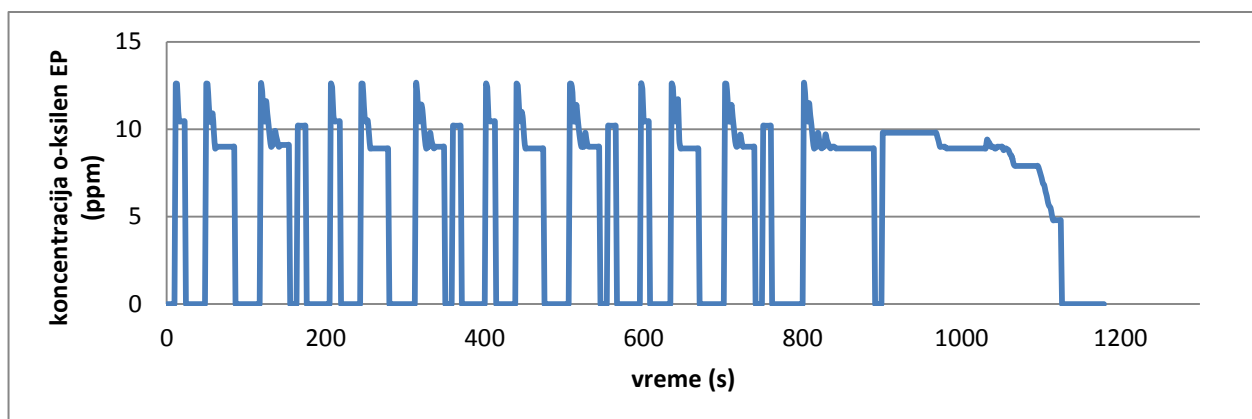
Grafik 2. Zavisnost koncentracije emitovanog toluena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo Europremium.



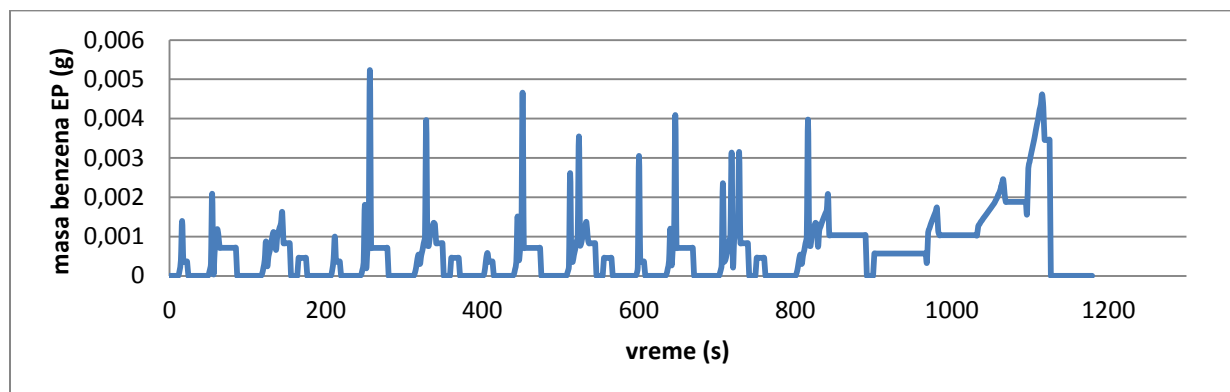
Grafik 3. Zavisnost koncentracije emitovanog etilbenzena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo Europremium.



Grafik 4. Zavisnost koncentracije emitovanog m,p-ksilena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo Europremium.

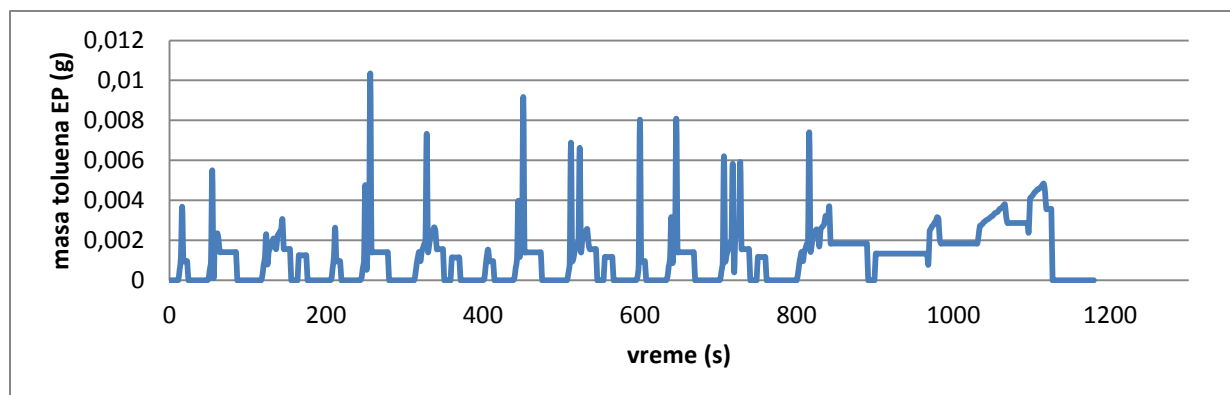


Grafik 5. Zavisnost koncentracije emitovanog o-ksilena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo Europremium.

Mase emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC

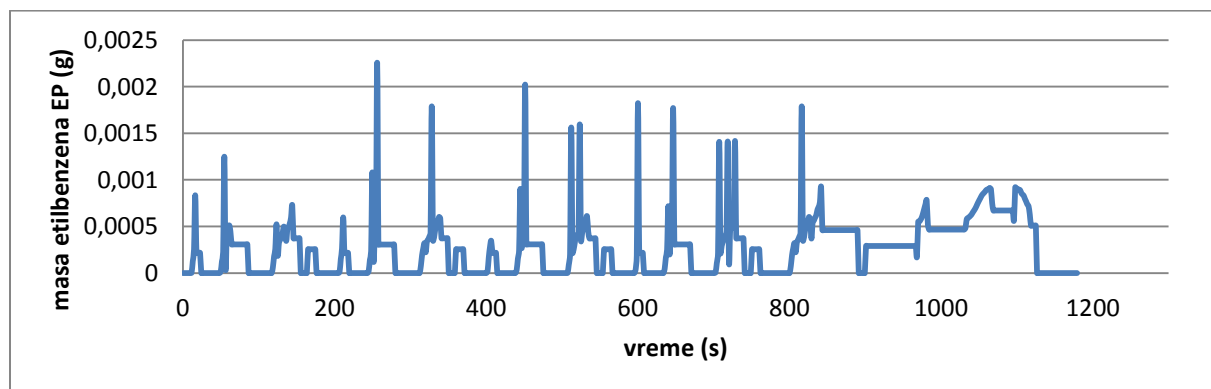
Grafik 6. Masa benzena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja EP benzina

Ukupna masa emitovanog benzena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,4514 g.



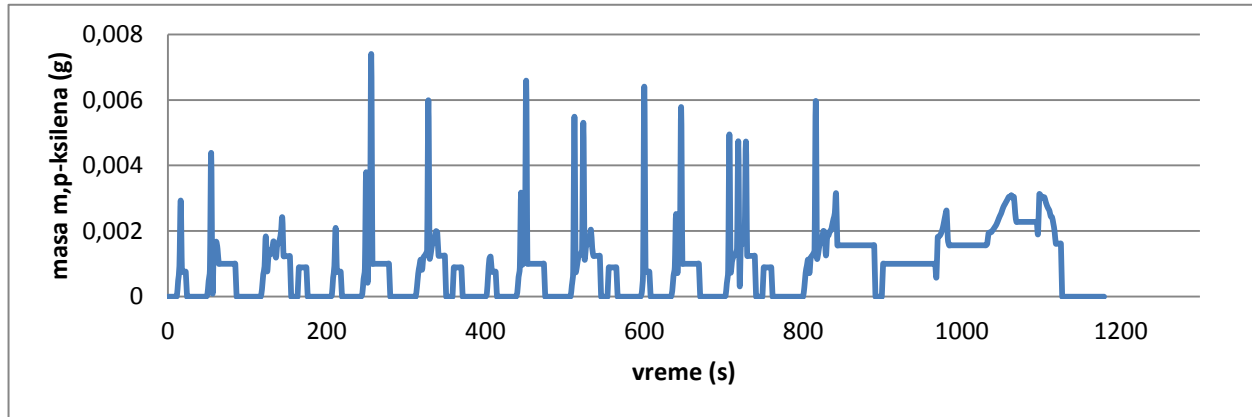
Grafik 7. Masa toluena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja EP benzina

Ukupna masa emitovanog toluena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,8559 g.



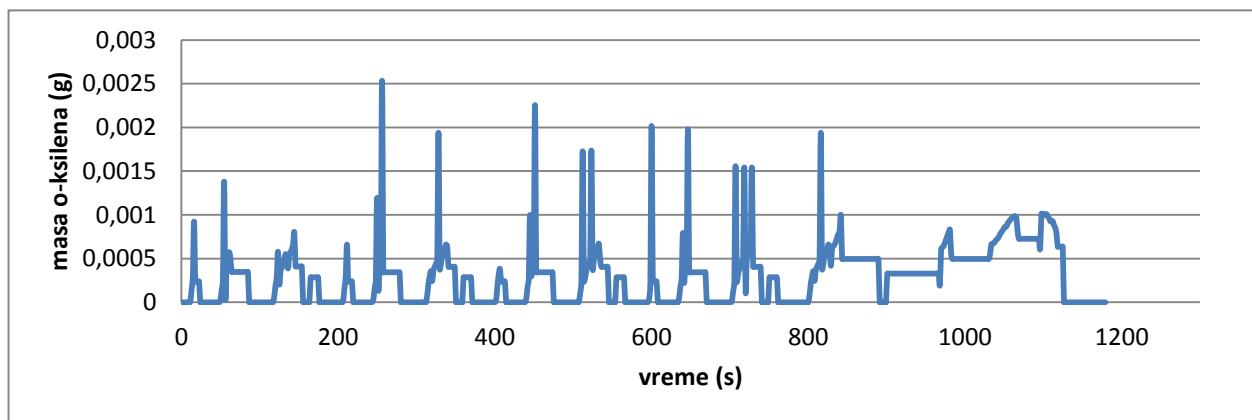
Grafik 8. Masa etilbenzena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja EP benzina

Ukupna masa emitovanog etilbenzena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,1931 g.



Grafik 9. Masa m,p-ksilena emitovanih tokom NEDC, prilikom korišćenja EP benzina

Ukupna masa emitovanih m,p-ksilena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,6526 g.



Grafik 10. Masa o-ksilena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja EP benzina

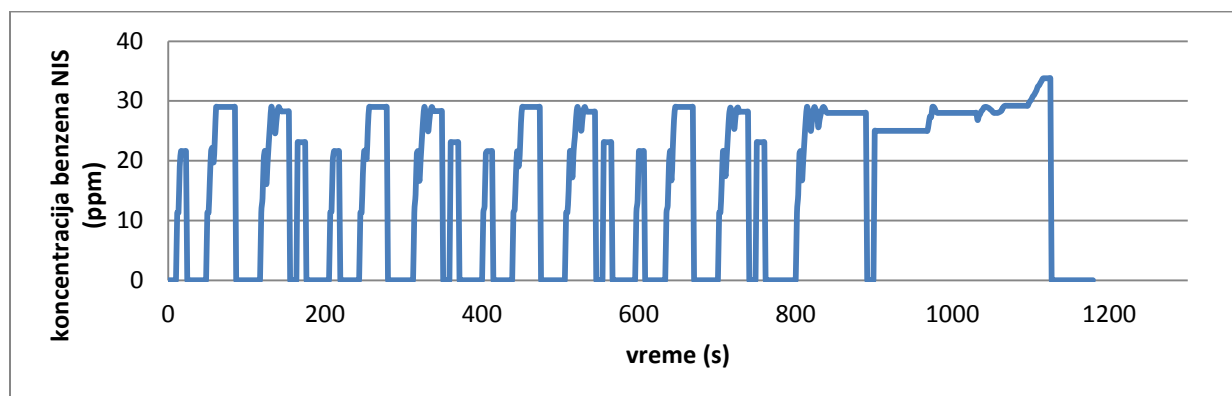
Ukupna masa emitovanog o-ksilena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,2137 g.

PRILOG IV

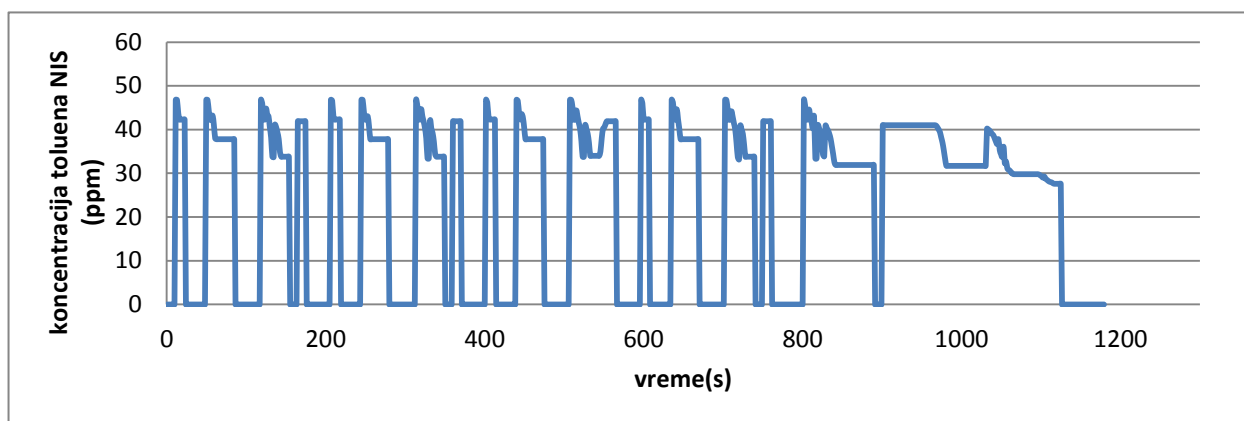
NIS benzin

Promene koncentracijonih nivoa i mase emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC, pri korišćenju NIS benzina kao pogonskog goriva.

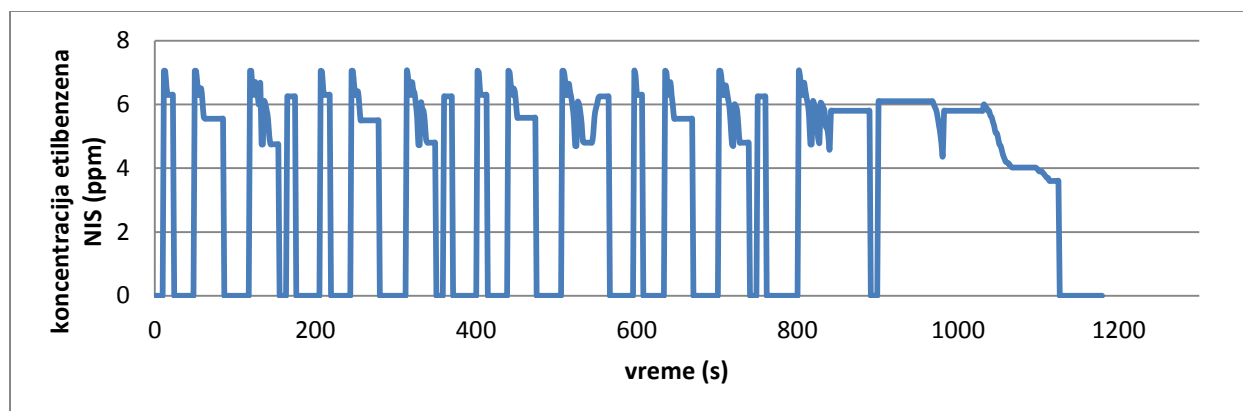
Promene koncentracijonih nivoa BTEX jedinjenja tokom NEDC



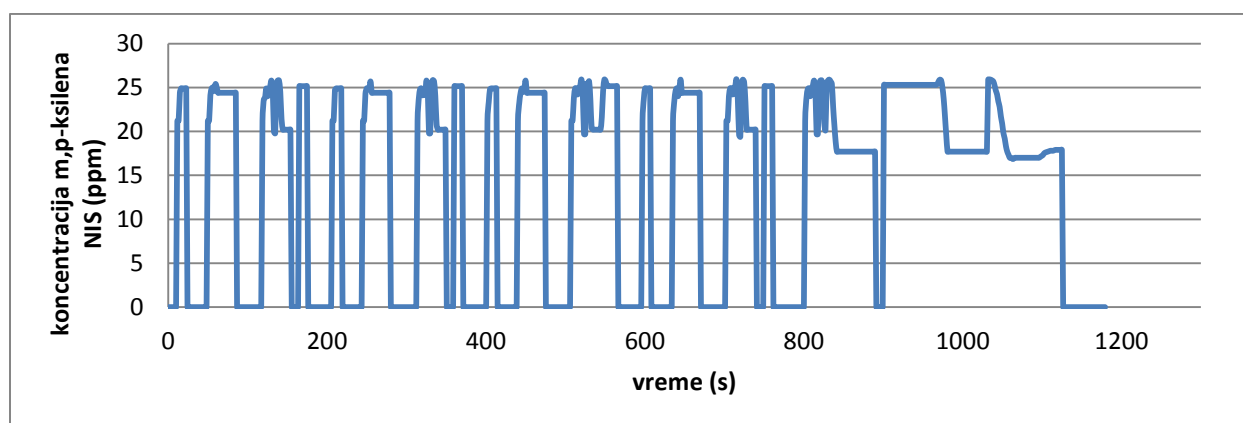
Grafik 1. Zavisnost koncentracije emitovanog benzena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo NIS.



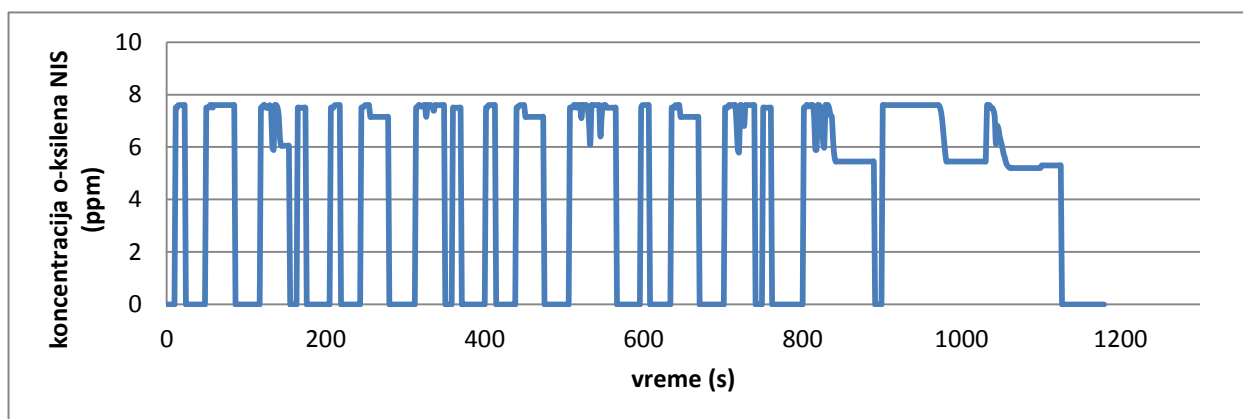
Grafik 2. Zavisnost koncentracije emitovanog toluena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo NIS.



Grafik 3. Zavisnost koncentracije emitovanog etilbenzena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo NIS.

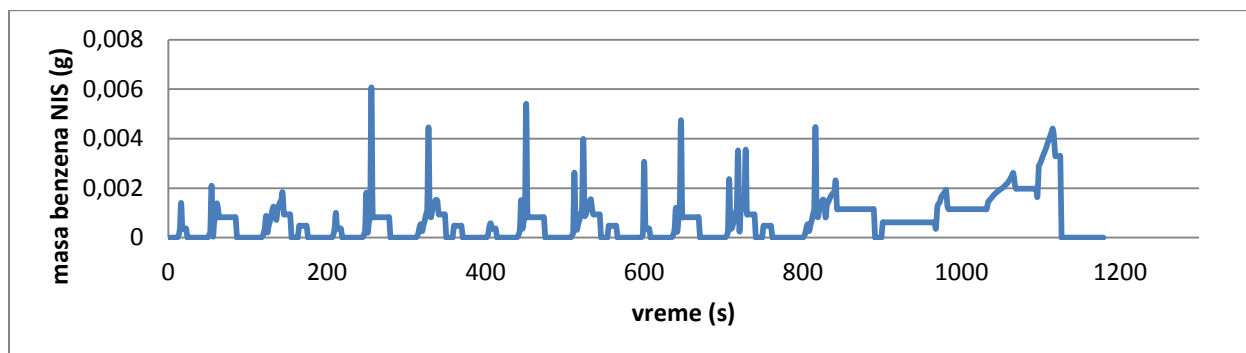


Grafik 4. Zavisnost koncentracije emitovanog m,p-ksilena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo NIS.



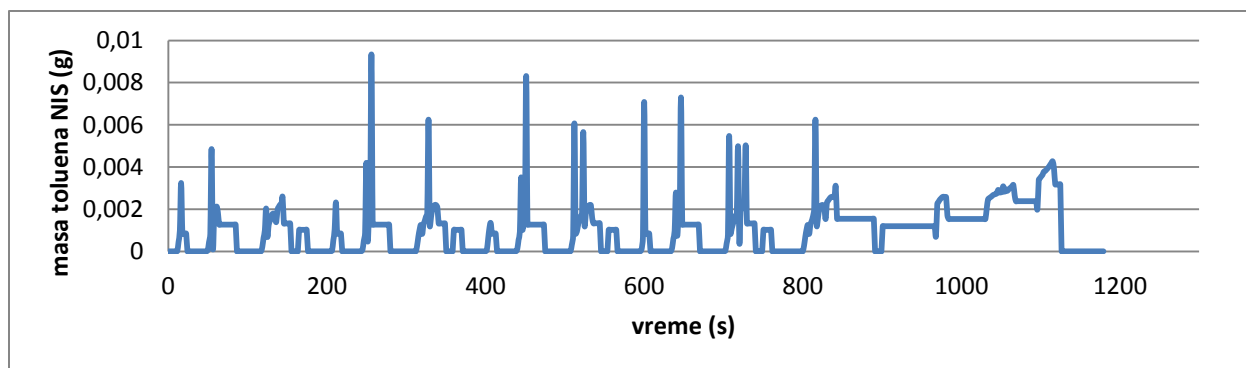
Grafik 5. Zavisnost koncentracije emitovanog o-ksilena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo NIS.

Mase emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC



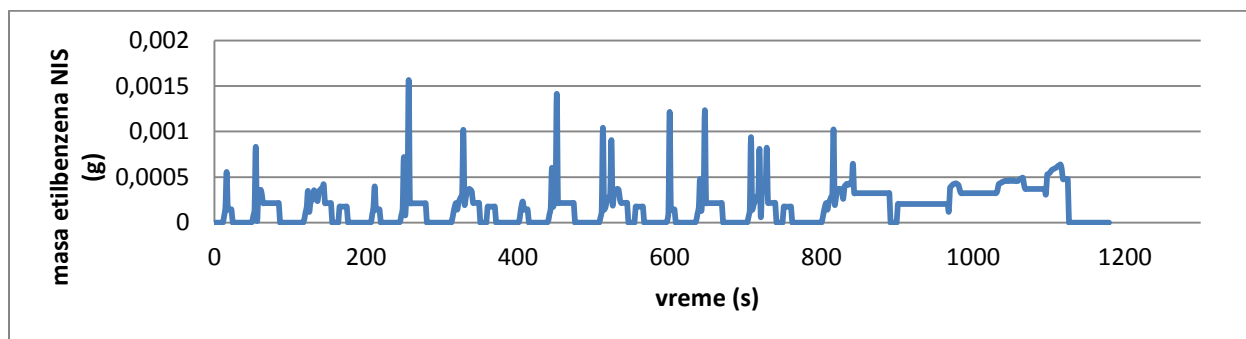
Grafik 6. Masa benzena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja NIS benzina.

Ukupna masa emitovanog benzena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,4885 g.



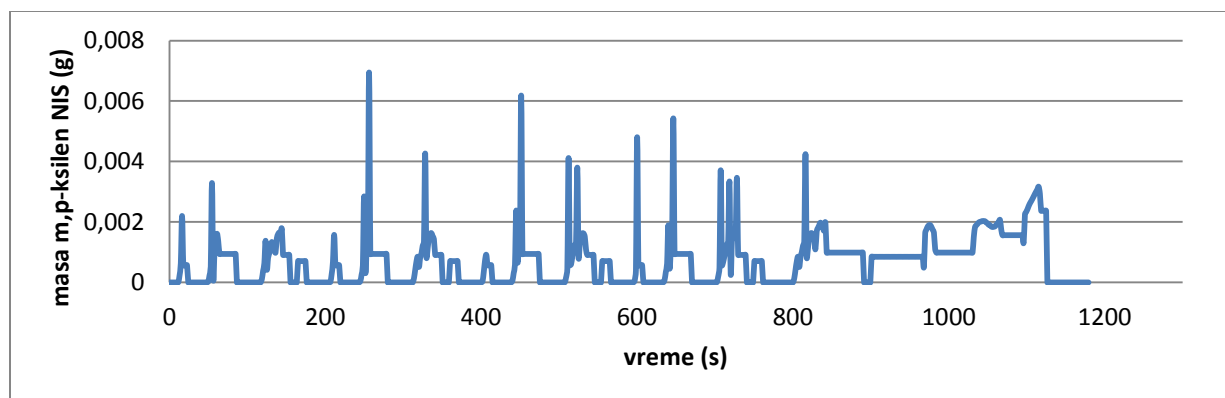
Grafik 7. Masa toluena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja NIS benzina

Ukupna masa emitovanog toluena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,7454 g.



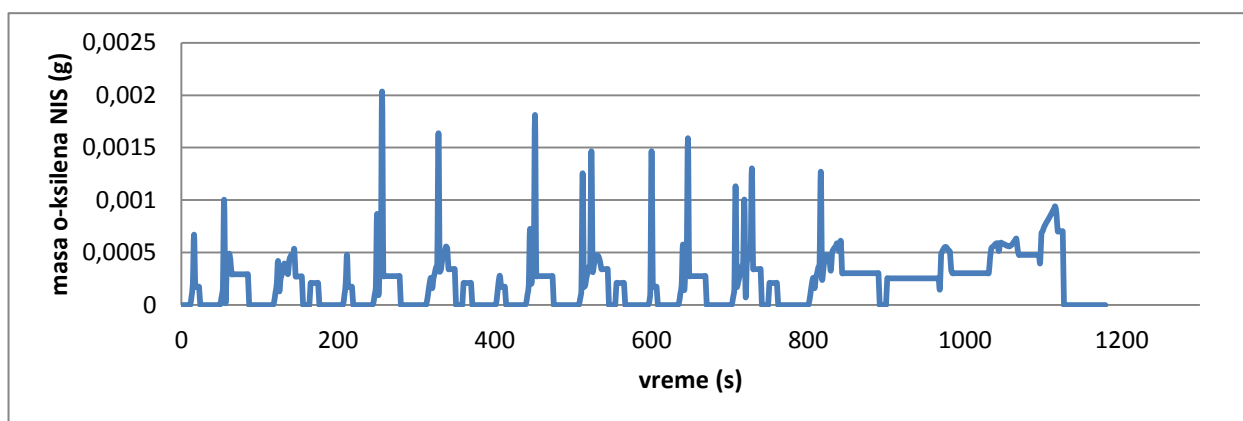
Grafik 8. Masa etilbenzena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja NIS benzina

Ukupna masa emitovanog etilbenzena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,1278 g.



Grafik 9. Masa m,p-ksilena emitovanih tokom NEDC, prilikom korišćenja NIS benzina

Ukupna masa emitovanih m,p-ksilena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,5175 g.



Grafik 10. Masa o-ksilena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja NIS benzina

Ukupna masa emitovanog o-ksilena tokom jednog ciklusa vožnje po NEDC obrascu iznosi 0,1583 g.

LISTA SLIKA

- Slika 2.1. Strukturne formule BTEX jedinjenja
- Slika 2.2. Produkti transformacije benzena u vazduhu
- Slika 2.3. Produkti transformacije toluena u vazduhu
- Slika 2.4. Osnovni putevi degradacije etilbenzena u atmosferi
- Slika 2.5. Emisija benzena u životnu sredinu u SAD
- Slika 2.6. Ekspozicija opšte populacije benzenu u SAD
- Slika 3.1. Šema motora sa unutrašnjim sagorevanjem
- Slika 3.2. Taktovi radnog ciklusa četvorotaktnog motora
- Slika 3.3. Tok energije kod Oto motora
- Slika 3.4. Tok oksidacije ugljovodonika
- Slika 3.5. Temperaturne zone tokom sagorevanja
- Slika 3.6. Šematski prikaz zone gašenja plamena u blizini zidova cilindra
- Slika 3.7. Šematski prikaz emisije ugljovodonika iz cilindra motora
- Slika 3.8. Uticaj koeficijenta viška vazduha (λ) na efektivnu snagu i specifičnu potrošnju goriva
- Slika 3.9. Karakteristike opterećenja karburatora
- Slika 3.10. Uticaj odnosa vazduha i goriva na relativne koncentracione nivoe polutanata u izduvnim gasovima motornih vozila
- Slika 3.11. Šematski prikaz termo reaktora za naknadno sagorevanje izduvnih gasova iz Oto motora
- Slika 3.12. Konstrukciono rešenje reaktora za dekontaminaciju izduvnih gasova uz pomoć katalizatora
- Slika 3.13. Trostepeni katalizator
- Slika 3.14. Lambda sonda
- Slika 4.1. Šematski prikaz eksperimentalne aparature
- Slika 4.2. Mobilni gasni hromatograf Voyager–Photovac, sa osnovnim radnim delovima.

Slika 4.3. Karakterističan hromatogram standarda BTEX gasova.

Slika 4.4. Šema separacije u koloni GC

Slika 4.5. Tipovi kolona Voyagera

Slika 4.6. Šema fotojonizacionog detektora

Slika 5.1. Koncentracija benzena u funkciji opterećenja motora

Slika 5.2. Koncentracija toluena u funkciji opterećenja motora

Slika 5.3. Zavisnost koncentracionih nivoa BTEX jedinjenja od broja obrtaja motora

Slika 5.4. Koncentracije BTEX jedinjenja u funkciji koeficijenta viška vazduha

Slika 5.5. Koncentracija benzena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slika 5.6. Koncentracija toluena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slika 5.7. Koncentracija etilbenzena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slika 5.8. Koncentracija m,p-ksilena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slika 5.9. Koncentracija o-ksilena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slika 5.10. Koncentracija BTEX jedinjenja u funkciji opterećenja motora

Slika 5.11. Koncentracije BTEX jedinjenja u funkciji broja obrtaja motora

Slika 5.12. Koncentracije BTEX jedinjenja u funkciji koeficijenta viška vazduha

Slika 5.13. Koncentracija benzena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slika 5.14. Koncentracija toluena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slika 5.15. Koncentracija etilbenzena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slika 5.16. Koncentracija m,p-ksilena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slika 5.17. Koncentracija komponente o-ksilena u zavisnosti od opterećenja, broja obrtaja motora i koeficijenta viška vazduha

Slika 6.1. Primer pseudo-stabilnog EMPA T115 ciklusa

Slika 6.3. Novi evropski ciklus vožnje

Slika 6.4. Urbani deo NEDC

Slika 6.5. Vangradski deo ciklusa vožnje NEDC

Slika 6.6. Potrošnja energije putničkog automobila Fiat Punto Classic tokom NEDC

Slika 6.7. Školjkasti dijagram

Slika 6.8. Specifična potrošnja goriva tokom NEDC, za Fiat Punto Classic.

Slika 6.9. Potrebna masa goriva za kretanje putničkog automobila FPC po obrascu NEDC

Slika 6.10. Zavisnost broja obrtaja od vremena prilikom kretanja FPC po obrascu NEDC

Slika 6.11. Potrošnja vazduha tokom NEDC

Slika 6.12. Zavisnost koncentracije emitovanog benzena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo Europremium.

Slika 6.13. Zavisnost koncentracije emitovanog toluena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo Europremium.

Slika 6.14. Masa benzena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja EP benzina

Slika 6.15. Masa toluena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja EP benzina

Slika 6.16. Zavisnost koncentracije emitovanog benzena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo NIS.

Slika 6.17. Zavisnost koncentracije emitovanog toluena od vremena tokom NEDC za FPC, gorivo NIS.

Slika 6.18. Masa benzena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja NIS benzina.

Slika 6.19. Masa toluena emitovanog tokom NEDC, prilikom korišćenja NIS benzina

Slika 6.20. Ukupna količina emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC, gorivo Europremium

Slika 6.21. Ukupna količina emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC, gorivo NIS

LISTA TABELA

Tabela 4.1. Specifikacija ispitivanog motora

Tabela 4.2. Osnovne karakteristike dinamometra SCHENCK W 230

Tabela 4.3. Karakteristike senzora pritiska

Tabela 4.4. Karakteristike pojačivača AVL 3059

Tabela 4.5. Osnovne karakteristike enkodera položaja kolenastog vratila

Tabela 4.6. Retenciona vremena BTEX komponenti na koloni Supelcowax 10.

Tabela 5.1. Deskriptivni pokazatelji zavisnih varijabli (koncentracija komponenti)

Tabela 5.2. Rezultati trofaktorske analize varijanse za merene komponente na gorivu Europremium

Tabela 5.3 Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor Opterećenje motora

Tabela 5.4. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor Broj obrtaja motora (n)

Tabela 5.5. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor Koeficijent viška vazduha

Tabela 5.6. Rezultati trofaktorske analize varijanse za merene komponente na gorivu NIS-a

Tabela 5.7. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor Opterećenje motora

Tabela 5.8. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor Broj obrtaja motora

Tabela 5.9. Post hoc analize razlika u koncentraciji komponenti za faktor Koeficijent viška vazduha

Tabela 5.10. Koeficijenti korelacije (r) između merenih osobina na primeru goriva Europremium

Tabela 5.11. Koeficijenti korelacije (r) između merenih osobina na primeru goriva NIS-a

Tabela 6.1. Tehničke karakteristike putničkog automobila FPC i parametri potrebni za proračun emisije BTEX jedinjenja

Tabela 6.2. Mase emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC voznog ciklusa, pogonsko gorivo Europremium

Tabela 6.3. Mase emitovanih BTEX jedinjenja tokom NEDC voznog ciklusa, pogonsko gorivo NIS benzin

LISTA SKRAĆENICA

AML	Akutna mijelogenozna leukemija
BCF	Faktor biokoncentracije
BTEX	Benzen, toluen, etilbenzen i izomeri ksilena
CPSC	Komisija za bezbednost proizvoda široke upotrebe
ECD	Detektor sa zahvatom elektrona
ECU	Elektronska upravljačka jedinica
EFI	Elektronsko ubrizgavanje goriva
EPA	Agencija za zaštitu životne sredine
EU	Evropska unija
EUDC	Vangradski ciklus vožnje
FPC	Fiat punto klasik
GC	Gasna hromatografija
HC	Ugljovodonici
IARC	Međunarodna agencija za istraživanje raka
IP	Jonizacioni potencijal
IUPAC	Međunarodna unija za čistu i primenjenu hemiju
log Koc	Sorpcioni koeficijent organskog ugljenika
log Kow	Koeficijent raspodele oktanol-voda
LRT	Transport na velike udaljenosti
MHC	Metilhidroksicikloheksadienil radikal
Motori SUS	Motori sa unutrašnjim sagorevanjem
NEDC	Novi evropski ciklus vožnje
NIS	Naftna industrija Srbije
PAN	Peroksiacetilnitrat
PID	Fotojonizacioni detektor
RV	Retenciono vreme
SAD	Sjedinjene američke države
SMT	Spoljna mrtva tačka
TVOC	Ukupne lakoisparljive komponente
UDC	Gradski vozni ciklus
UMT	Unutrašnja mrtva tačka
UNECE	Evropska ekonomska komisija Ujedinjenih nacija
UV	Ultravioletni
VOC	Lako isparljiva organska jedinjenja
WHO	Svetska zdravstvena organizacija

LISTA OZNAKA

A	[m ²]	Čeona površina vozila
c _w	[-]	Empirijski koeficijent otpora vazduha
D	[cm]	Rastojanje gašenja plamena u cilindru motora
E	[kWh]	Energija potrebna za kretanje vozila
E _A	[J]	Energija aktivacije
E _f	[kWh]	Energija potrebna za savladavanje otpora kotrljanja
E _{IN}	[kWh]	Energija potrebna za savladavanje otpora inercije
E _w	[kWh]	Energija potrebna za savladavanje otpora vazduha
E _α	[kWh]	Energija potrebna za savladavanje otpora uspona
f	[-]	Koeficijent otpora kotrljanja
F _f	[N]	Sila otpora kotrljanja
F _{IN}	[N]	Sila otpora inercije
F _w	[N]	Sila otpora vazduha
F _α	[N]	Sila otpora uspona
G	[N]	Težina vozila
g _e	[g/kWh]	Specifična efektivna potrošnja goriva
G _h	[g/h]	Časovna potrošnja goriva
H	[m]	Visina penjanja
M	[Nm]	Obrtni moment motora
m _g	[g]	Masa sagorelog goriva
M _g	[g/mol]	Srednja molarna masa benzina (108 g/mol ATSDR),
m _v	[g]	Masa vazduha potrebnog za sagorevanje
M _v	[g/mol]	Srednja molarna masa vazduha (29 g/mol)
n	[o/min]	Broj obrtaja motora
n _g	[mol]	Količina sagorelog goriva
n _v	[mol]	Količina potrošenog vazduha
p	[Pa]	Pritisak na izduvu (101325 Pa)
P _e	[kW]	Efektivna snaga motora
P _T	[kW]	Potrebna snaga na pogonskom točku
R	[J/molK]	Univerzalna gasna konstanta (8,314 J/molK)
s	[cm]	Hod klipa
S	[km]	Pređeni put vozila
T	[K]	Temperatura izduvnih gasova (600°C, 873°K)
t _{1/2}	[s]	Vreme poluživota
v	[km/h]	Brzina kretanja vozila
V	[m ³]	Zapremina izduvnih gasova
V _C	[cm ³]	Kompresiona zapremina
V _h	[cm ³]	Radna zapremina cilindra

V_{\max}	[cm ³]	Ukupna zapremina cilindra
α	[°]	Nagib uspona
ε	[-]	Stepen kompresije
λ	[-]	Koeficijent viška vazduha
ξ	[-]	Stepen opterećenja motora
ρ	[kg/m ³]	Gustina vazduha (1,2 kg/m ³)

Statističke oznake

df	Broj stepeni slobode
F	Test statističke značajnosti efekata
Ku	Stepen spljoštenosti distribucije podataka
M	Srednja razlika rezultata
MS	Srednja vrednost kvadrata
M_v	Srednja vrednost
N	Ukupan broj analiza
p	Nivo značajnosti rezultata
r	Koeficijent korelacije
SD	Standardna devijacija
SE	Standardna greška
Sk	Stepen zakrivljenosti distribucije podataka
SS	Suma kvadrata