

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ante Kozina

**MODEL HIBRIDNOG ELEKTRIČNOG VOZILA U
FREKVENCIJSKOJ DOMENI ZA PREDVIĐANJE
POTROŠNJE I EMISIJA**

DOKTORSKI RAD

Split, 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ante Kozina

***Model hibridnog električnog vozila u frekvencijskoj domeni
za predviđanje potrošnje i emisija***

DOKTORSKI RAD

Split, 2024.

Doktorski rad je izrađen na Katedri za toplinske strojeve, Zavoda za strojarstvo i brodogradnju, Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Splitu

Mentor: prof. dr. sc. Gojmir Radica

Rad br.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: hibridna električna vozila, emisijski modeli, modalni modeli, kontrola emisija, strategije upravljanja

Znanstveno područje: tehničke znanosti

Znanstveno polje: strojarstvo

Znanstvena grana: procesno energetska strojarstvo

Institucija na kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: prof. dr. sc. Gojmir Radica

Broj stranica: 112

Broj slika: 51

Broj tablica: 3

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 130

Povjerenstvo za ocjenu disertacije:

1. prof. dr. sc. Branko Klarin, Sveučilište u Splitu, FESB, Split
2. prof. dr. sc. Zoran Lulić, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb
3. prof. dr. sc. Tomislav Mrakovčić, Sveučilište u Rijeci, TF, Rijeka
4. prof. dr. sc. Sandro Nižetić, Sveučilište u Splitu, FESB, Split
5. doc. dr. sc. Željko Penga, Sveučilište u Splitu, FESB, Split

Povjerenstvo za obranu disertacije:

1. prof. dr. sc. Branko Klarin, Sveučilište u Splitu, FESB, Split
2. prof. dr. sc. Zoran Lulić, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb
3. prof. dr. sc. Tomislav Mrakovčić, Sveučilište u Rijeci, TF, Rijeka
4. prof. dr. sc. Sandro Nižetić, Sveučilište u Splitu, FESB, Split
5. doc. dr. sc. Željko Penga, Sveučilište u Splitu, FESB, Split

Disertacija obranjena dana: 13. prosinca 2024.

Model hibridnog električnog vozila u frekvencijskoj domeni za predviđanje potrošnje i emisija

Sažetak:

Doktorski rad predstavlja objedinjeno istraživanje koje čine četiri objavljena rada u uglednim znanstvenim časopisima prema skandinavskom modelu. Područje znanstvenog istraživanja usmjereno je na procjene emisija i potrošnje goriva u stvarnim uvjetima upotrebe vozila primarno pokretanih motorima s unutarnjim izgaranjem. U svrhu kvalitetnijeg predviđanja emisija, potrošnje goriva i potrošnje energije razvijen je model hibridnog električnog vozila na temelju modalne analize uz primjenu odgovarajućeg dijagrama toka energije definiranog prema funkcionalnoj podjeli. Razvijeni model povezuje pojedinačne emisije i potrošnju energije s uzdužnom dinamikom vozila. Provedenim istraživanjem utvrđeno je kako je na razvijeni model moguće uspješno primijeniti globalnu strategiju upravljanja, temeljenu na pravilima, u više različitih standardnih ciklusa vožnje i u stvarnim uvjetima upotrebe. Predloženi model validiran je u odnosu na kontrolni model prema Novom europskom ciklusu ispitivanja, Globalno usklađenom ispitnom ciklusu te u okolnostima koje repliciraju stvarne uvjete upotrebe. Rezultati provedene usporedbe pokazuju točnije predviđanje emisija i potrošnje goriva sa značajno manjom relativnom pogreškom na razini ciklusa u odnosu na rezultate postojećih modalnih modela. U radu je provedeno i eksperimentalno istraživanje u cilju utvrđivanja količina emisija ispušnih plinova u stvarnim uvjetima upotrebe ispravnih vozila, kao i u slučaju vozila s kvarom na sustavima kontrole emisija. Zaključci istraživanja pridonijeli su razumijevanju utjecaja stvarnih uvjeta upotrebe kao i dugotrajne eksploatacije na emisije te sustave njihove kontrole.

Ključne riječi:

hibridna električna vozila, emisijski modeli, modalni modeli, kontrola emisija, strategije upravljanja

Model of hybrid electric vehicle in the frequency domain for consumption and emission prediction

Abstract:

This doctoral thesis presents a comprehensive study comprising four published papers in reputable scientific journals, adhering to the Scandinavian model. The research primarily focuses on assessing emissions and fuel consumption under real-world conditions for vehicles primarily powered by internal combustion engines. To improve the accuracy of emission and consumption predictions, an innovative hybrid electric vehicle model was developed based on modal emissions analysis. This model incorporates energy flow diagrams that are based on their purpose. The developed model integrates the longitudinal dynamics of the vehicle and energy flows with fuel consumption and individual emissions. The research demonstrates the successful application of a global rule-based energy management strategy to the developed model across various standard driving cycles and under real-world conditions as defined by Real Driving Emissions (RDE) regulations. The model was validated against control models using the New European Driving Cycle (NEDC), Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC), and real-world driving conditions. Comparative results show that the proposed model provides more accurate predictions of emissions and consumption, with significantly lower relative error in tested driving cycles compared to existing modal models based on Vehicle Specific Power (VSP) analysis. Additionally, the thesis includes experimental research on exhaust gas emissions from vehicles under real driving conditions. This research was conducted on both fully operational vehicles and those with malfunctioning emission control systems. The findings contribute to a deeper understanding of the impact of real-world driving conditions and long-term vehicle operation on emissions and the performance of emission control systems.

Keywords:

hybrid electric vehicles, emission models, modal models, emission control, energy management strategies.

Zahvala

Prije svega posebnu zahvalnost izražavam prof. dr. sc. Gojmiru Radici, najprije kao čovjeku a onda i kao mentoru na vođenju, dugogodišnjem strpljenju i savjetima tijekom cijelog studija. Zahvaljujem se kolegama s katedre za toplinske strojeve i termodinamiku na pomoći i savjetima, posebno kolegi Tinu Vidoviću na aktivnom sudjelovanju u istraživanju i objavama znanstvenih radova. Također se zahvaljujem kolegama sa katedre za motore i vozila zagrebačkog FSB-a na ustupanju opreme, prostora i vlastitog vremena koje je bilo daleko iznad mojih očekivanja. Prijateljima i rodbini koji su svoje slobodno vrijeme uložili u ovaj rad, onima koji su me potakli na odluku o studiju i onima koji su mi ustupili svoja vozila i opremu upućujem jedno veliko hvala. S toplinom u srcu zahvaljujem svojim roditeljima Veselki i Stanku koji su uz nesebičnu ljubav i strpljivost pomogli da izrastem u osobu kakva sam danas. Hvala na potpori mojim najboljim prijateljima još od djetinjstva, sestri Ivanki i bratu Marku koji su uvijek bili u blizini. Na kraju najvažniju zahvalnost izražavam svojoj supruzi Anđeli, sinovima Luki i Marku te kćeri Ivani na pruženoj ljubavi, potpori i strpljenju koje su imali za mene, jer su možda na najteži način iskusili teret mog profesionalnog razvoja.

Nakon svakog životnog uspjeha ne zaboravimo da:

„Čovjekova vrijednost sastoji se u onome što on jest, a ne u tome što radi ili posjeduje“.

Sv. Ivan Pavao II

Sadržaj

Sažetak:	iii
Abstract:	iv
Zahvala	vi
Sadržaj	vii
Popis slika.....	ix
Popis kratica	xi
1. UVOD	1
1.1. Motivacija i hipoteza.....	1
1.2. Znanstvene metode i znanstveni doprinos	4
1.3. Objavljeni radovi na kojima se temelji doprinos	8
1.4. Pregled organizacije disertacije.....	9
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA IZ PODRUČJA RADA	10
2.1. Emisije, modeli emisija i sustavi za njihovu regulaciju	10
2.2. Modeliranje klasičnih i HEV i strategije upravljanja.....	23
2.3. Modalna analiza pomoću specifične snage	32
2.4. Dijagram toka energije HEV-a.....	36
2.5. Sažetak postojećeg stanja i smjernice daljnjeg istraživanja	38
3. PROVEDENO EKSPERIMENTALNO I NUMERIČKO ISTRAŽIVANJE I RAZVOJ EMISIJSKOG MODELA	42
3.1. Primjena numeričkog 1D/QD modela motora u ispitivanju koncepta povećanja učinkovitosti izmjene radne tvari kod benzinskog motora pri djelomičnom opterećenju	42
3.2. Predstavljanje modalnog modela hibridnog električnog vozila i analiza utjecaja kvara sustava za regulaciju emisija na njihov nastanak temeljena na metodi grupiranja snage	48

3.2.1 Emisije vozila pokretanih dizelskim motorima u stvarnim uvjetima upotrebe i analiza utjecaja kvara sustava za regulaciju emisija na njihov nastanak temeljena na metodi grupiranja snage	52
3.2.2. Predstavljanje modalnog emisijskog modela i modela potrošnje goriva hibridnog električnog vozila i primjena na ispitivano vozilo.....	57
3.3. Validacija klasičnog i HEV modela na osnovi modalnih emisija i potrošnje goriva prema specifičnoj snazi	63
4. PREGLED OBJAVLJENIH RADOVA NA KOJIMA SE TEMELJI DOPRINOS....	73
4.1. Rad 1: Povećanje učinkovitosti izmjene radne tvari kod benzinskog motora pri djelomičnom opterećenju primjenom dvostrukog otvaranja ispušnih ventila.....	73
4.1.1. Doktorandov doprinos radu.....	74
4.2. Rad 2: Analiza sustava za redukciju emisija ispušnih plinova dizelskih motora. 74	
4.2.1. Doktorandov doprinos radu.....	74
4.3. Rad 3: Analiza emisija dizelskih vozila u okolnostima kvara sustava za regulaciju emisija	75
4.3.1. Doktorandov doprinos radu.....	76
4.4. Rad 4: Novi model hibridnog vozila na osnovi analize emisija i potrošnje goriva prema specifičnoj snazi	76
4.4.1. Doktorandov doprinos radu.....	77
5. ZAKLJUČAK	78
5.1. Smjernice za daljnja istraživanja.....	82
LITERATURA	84
PRILOG A.....	92
PRILOG B.....	93
PRILOG C.....	94
PRILOG D.....	95

ŽOVOTOPIS..... 96

BIOGRAPHY..... 97

Popis slika

Slika 1. Metode i faze istraživanja.	6
Slika 2. Proces izrade i vrednovanja modela.	7
Slika 3. Prosječni sastav ispušnih plinova dizelskog motora [18].	11
Slika 4. Formiranje NO _x emisija u ovisnosti o temperaturi izgaranja i pretičku kisika [20].	12
Slika 5. Utjecaj EGR-a na NO _x , PM, HC i CO emisije [42].	15
Slika 6. Odziv motora kod različitih euro propisa za HP i LP EGR [43].	16
Slika 7. Učinkovitost različitih katalizatora na redukciju CO, HC i NO _x u funkciji AFR-a [42].	16
Slika 8. Stupanj učinkovitosti NO _x u LNT za period od 60 s i 180 s [47].	17
Slika 9. Temperaturna ovisnost redukcije NO _x za različite katalitičke materijale [53].	18
Slika 10. Učinkovitost redukcije NO _x : a) s čistim NO i b) s mješavinom NO ₂ /NO 1:1 [54].	19
Slika 11. Utjecaj temperature termolize na učinkovitost razgradnje uree [55].	19
Slika 12. Učinak različitih tehnologija kontrole emisija u cilju dostizanja različitih emisijskih razina [2].	21
Slika 13. Usporedba različitih koncepata sustava kontrole emisija dizelskih vozila [2].	22
Slika 14. Podjela modela s obzirom na razmjere upotrebe [70].	23
Slika 15. Podjela emisijskih modela i modela potrošnje goriva odnosno energije [72].	24
Slika 16. Kinematički unatražni pristup [17].	26
Slika 17. Kvazistatički unapredni model vozila [17].	26
Slika 18. Osnovni zahtjevi EMS HEV-a [99].	29
Slika 19. Klasifikacija EMS [103].	30
Slika 20. Usporedba različitih strategija upravljanja energijom [103].	31
Slika 21. Usporedba korelacije CO ₂ emisija s VSP parametrom vozila i VSP parametrom motora [115].	34
Slika 22. Podjela gubitaka elementa B kod dvosmjernog toka energije [120].	36
Slika 23. Dijagram toka energije paralelnog HEV-a prema [121].	38
Slika 24. Pregled različitih emisijskih modela i modela potrošnje goriva.	39
Slika 25. Planirani elementi emisijskog modela HEV-a.	41
Slika 26. Grafički prikaz testnog modela motora u programskom paketu AVL-Boost.	43
Slika 27. Indikatorski dijagrami testiranog motora [1].	44

Slika 28. Podizaj ispušnih ventila u odnosu na kut koljenastog vratila.	45
Slika 29. Ovisnost ISFC-ja o pomaku VOS-a i VCS-a ($^{\circ}$ KV) za 2 bar BMEP-a.	45
Slika 30. Ovisnost ISFC-ja o pomaku VCS-a ($^{\circ}$ KV) za 2 bar BMEP-a.	46
Slika 31. Prikaz testne rute na topografskoj karti.	50
Slika 32. Oprema za mjerenje emisija postavljena na vozilo.	51
Slika 33. Mjerenje momenta direktno na pogonskoj osovini vozila.	51
Slika 34. Usporedba jediničnih rezultata emisija NO_x -a u odnosu na granične vrijednosti za statistički standardizirane emisije prema RDE-u i neobrađeni podaci mjerenja [3].	53
Slika 35. Usporedba jediničnih rezultata emisija CO u odnosu na granične vrijednosti za statistički standardizirane emisije prema RDE-u i neobrađeni podaci mjerenja [3].	53
Slika 36. Usporedba jediničnih rezultata emisija CO_2 u odnosu na granične vrijednosti za statistički standardizirane emisije prema RDE-u i neobrađeni podaci mjerenja [3].	54
Slika 37. CO emisije u praznom hodu i u vožnji [3].	55
Slika 38. Učinkovitost oksidacijskog katalizatora u ovisnosti o temperaturi [3].	56
Slika 39. Pretičak kisika u vožnji i praznom hodu [3].	56
Slika 40. Granice razreda snage i udjeli u standardnoj vožnji.	58
Slika 41. Izmjerene emisije CO_2 u razredima snage	59
Slika 42. Raspodjela energije vozila u stvarnim uvjetima vožnje.	61
Slika 43. Raspodjela emisija i pogonske energije raspodijeljena prema rasponima snage [3].	63
Slika 44. Usporedba emisija klasičnog i hibridnog pogona [3].	64
Slika 45. Shematski prikaz CruiseM modela.	65
Slika 46. Vozilo na ispitnim valjcima s ugrađenom mjernom opremom.	66
Slika 47. NO_x emisijska mapa određena mjerenjem na ispitnim valjcima.	66
Slika 48. Testna ruta i profil brzine tijekom ispitivanja.	67
Slika 49. (A) Raspodjela energije i emisija VSP hibridnog modela u RDE uvjetima vožnje, (B) Vremenski udjeli razreda i (C) Prosječna snaga razreda.	70
Slika 50. Usporedba predviđanja emisija CO_2 za različite modele i cikluse [4].	71
Slika 51. Usporedba predviđanja emisija NO_x -a za različite modele i cikluse [4].	71

Popis kratica

AFR	Omjer zraka i goriva (<i>engl. Air to Fuel Ratio</i>)
BMEP	Srednji efektivni tlak (<i>engl. Brake Mean Effective Pressure</i>)
CD	Pražnjenje baterije (<i>engl. Charge Depleting</i>)
CFD	Računalna dinamika fluida (<i>engl. Computational Fluid Dynamics</i>)
CS	Održavanje konstantne razine napunjenosti (<i>engl. Charge Sustain</i>)
DOC	Dizelski oksidacijski katalizator (<i>engl. Diesel Oxidation Catalyst</i>)
DPF	Filter dizelskih čestica (<i>engl. Diesel Particulate Filter</i>)
DVA	Dvostruko aktiviranje ventila (<i>engl. Double Valve Actuation</i>)
EGR	Recirkulacija ispušnih plinova (<i>engl. Exhaust Gas Recirculation</i>)
EMS	Strategije upravljanja energijom (<i>engl. Energy Management Strategy</i>)
EV	Električno vozilo (<i>engl. Electric Vehicle</i>)
FHEV	Potpuno hibridno električno vozilo (<i>engl. Full Hybrid Electric Vehicle</i>)
GPF	Filter benzinskih čestica (<i>engl. Gasoline Particulate Filter</i>)
HEV	Hibridno električno vozilo (<i>engl. Hybrid Electric Vehicle</i>)
HP-EGR	Visokotlačna recirkulacija ispušnih plinova (<i>engl. High Pressure Exhaust Gas Recirculation</i>)
IMEP	Indicirani srednji efektivni tlak (<i>engl. Indicated Mean Effective Pressure</i>)
ISFC	Indicirana specifična potrošnja goriva (<i>engl. Indicated Specific Fuel Consumption</i>)
°KV	Kut koljenastog vratila
LNT	Katalizator NO _x -a u uvjetima siromašne smjese (<i>engl. Lean NO_x Trap</i>)
LP-EGR	Niskotlačna recirkulacija ispušnih plinova (<i>engl. Low Pressure Exhaust Gas</i>)
MSUI	Motor s unutarnjim izgaranjem
NEDC	Novi europski ispitni ciklus (<i>engl. New European Driving Cycle</i>)
OBD	Dijagnostika na vozilu (<i>engl. On Board Diagnostic</i>)
PEMS	Prijenosni sustav za mjerenje emisija (<i>engl. Portable Emissions Measurement System</i>)

PHEV	Hibridno električno vozilo s mogućnosti napajanja iz električne mreže (<i>engl. Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>)
PMEP	Srednji efektivni tlak izmjene radne tvari (<i>engl. Pumping Mean Effective Pressure</i>)
PM	Masa čestica (<i>engl. Particulate Matter</i>)
PMS	Strategija upravljanja snagom (<i>engl. Power Management Strategy</i>)
PN	Broj čestica (<i>engl. Particulate Number</i>)
RDE	Emisije u stvarnim uvjetima upotrebe (<i>engl. Real Driving Emissions</i>)
SCR	Selektivna katalitička redukcija (<i>engl. Selective Catalytic Reduction</i>)
SoC	Stanje napunjenosti baterije (<i>engl. State of Charge</i>)
STP	Stanica za tehnički pregled
VCS	Pomak zatvaranja ventila (<i>engl. Valve Closing Shift</i>)
VOS	Pomak otvaranja ventila (<i>engl. Valve Opening Shift</i>)
VSP	Specifična snaga vozila (<i>engl. Vehicle Specific Power</i>)
WLTC	Globalno usklađeni ispitni ciklus za laka vozila (<i>engl. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle</i>)

1. UVOD

Doktorski rad izrađen je na temelju skupa od četiri objavljena znanstvena rada [1-4] po skandinavskom modelu. Objavljeni radovi čine zaokruženu znanstveno-istraživačku cjelinu i daju novi znanstveni doprinos u području tehničkih znanosti. U uvodnom dijelu predstavljena je motivacija i hipoteza znanstvenog istraživanja, zatim je opisan postupak istraživanja koji je korišten u potvrdi hipoteze uz elaborirane temeljne znanstvene doprinose rada.

1.1. Motivacija i hipoteza

Stalno povećanje transportnih potreba i težnja čovječanstva za samoodrživosti usmjerava proizvođače vozila prema tehnologijama koje doprinose smanjenju štetnih emisija, posebice ugljikovog dioksida. Pojedine zemlje poput EU-a i nekih dijelova SAD-a najavljuju zabranu prodaje osobnih automobila pogonjenih fosilnim gorivima [5], dok je ova zabrana teško primjenjiva na manje razvijene dijelove svijeta s lošijom infrastrukturom [6]. Dugoročni je cilj EU-a značajno smanjenje emisija stakleničkih plinova u transportu [7], planirano je od 2025. godine smanjiti emisije CO₂ za dodatnih 15 % u odnosu na 2021. za nova putnička vozila i laka komercijalna vozila. Prema [8], na svim razinama hibridizacije udio novoregistriranih HEV-a, ovisno o nivou ambicioznosti redukcije CO₂, trebao bi biti između 29 % i 56 % do 2030. Posljednjih 15 godina brzohodni motori s unutarnjim izgaranjem postigli su vrlo visoku učinkovitost, dizelski postižu vršnu učinkovitost i veću od 40 % [9], ali teško da mogu ispuniti zahtjeve sljedećeg Euro 7 emisijskog propisa [10, 11] kao samostalni pogonski sklop [12]. Osnovni je razlog tome sporo postizanje radne temperature motora i sustava za kontrolu emisija, neučinkovito raspolaganje mehaničkom energijom i veliki pad učinkovitosti kod niskih opterećenja. Pad učinkovitosti povezan je s izostankom rekuperacije mehaničke energije kočenja i radom motora u radnoj točki koja je ograničena trenutnim zahtjevom korisnika. Zbog loše definicije starijih emisijskih propisa proizvođači su trebali osigurati poštivanje graničnih vrijednosti samo u uskom području radnih parametara vozila koja uključuje ispitni ciklus. Posljednjih desetak godina ostvaren je napredak u pogledu stvarnog poštivanja zakonskih graničnih vrijednosti emisija u značajno većem dijelu uvjeta vožnje uvođenjem RDE ispitivanja (*engl. Real Driving Emissions*) kao sastavnog dijela procesa tipskog odobrenja. Daljnji napredak očekuje se u osiguravanju poštivanja graničnih vrijednosti svih emisija u cijelom eksploatacijskom periodu vozila. Pokazalo se da s porastom složenosti pogonskih sustava, osobito sustava kontrole emisija, raste i utjecaj kvarova na povećanje količine emisija. Područje emisija vozila u dugotrajnoj eksploataciji i osobito u slučajevima kvarova sustava njihove kontrole nije dovoljno istraženo. Hibridna električna vozila (HEV) koja kombiniraju prednosti

potpuno električnih vozila (EV) i klasičnih vozila, imaju visok stupanj fleksibilnosti kao i mogućnost ispunjavanja šireg spektra zahtjeva u vožnji, ali isto tako i veću osjetljivost na ranije spomenute kvarove. Neophodni sustavi za regulaciju emisija, koje zahtijevaju najnoviji emisijski propisi, zahtijevaju brzo dostizanje radne temperature kao i periodične regeneracije. Za postizanje navedenih uvjeta ključan je veći broj stupnjeva slobode upravljanja energijom koji omogućuju HEV. Najznačajnija prednost u odnosu na klasična vozila pogonjena samo motorom s unutarnjim izgaranjem (MSUI) je daleko učinkovitije raspolaganje mehaničkom energijom kroz mogućnost uštede energije regenerativnim kočenjem ili spremanjem viška energije kod pomaka radnog područja prema onom s najvišom učinkovitosti MSUI-ja. Prednost je i u korištenju manjih, lakših i jednostavnijih jednorežimskih motora s unutarnjim izgaranjem. Najznačajnija prednost HEV vozila u odnosu na potpuno električna vozila je superioran doseg s jednim punjenjem i brzina dopunjavanja koja se postiže upotrebom kemijske energije goriva umjesto električne [13]. Zbog navedenog, hibridna električna vozila su svakako jedno od ključnih rješenja za povećanje učinkovitosti i smanjenje emisija osobito uz primjenu ekološki prihvatljivih, sintetičkih, CO₂ neutralnih goriva prihvatljive cijene [14] ili alternativnih goriva poput ukapljenog plina sa značajno manjim emisijama i CO₂ otiskom [15] u zemljama u razvoju. Takvi pogonski sustavi svakako će naći svoju primjenu u teškim kamionima za velike udaljenosti, u civilnim vozilima posebnih primjena, terenskim vozilima i vozilima za vojne svrhe [16] u sljedećim razdobljima bez obzira na stupanj elektrifikacije cestovnog prometa. Predviđanje udjela HEV-a u budućnosti je vrlo teško predvidjeti zbog prilično ambicioznih i promjenjivih planova reduciranja CO₂ emisija. Za stvaranje kvalitetnog upravljanja hibridnih vozila, uzimanjem u obzir specifičnosti načina rada motora s unutarnjim izgaranjem, potrebno je dobro poznavanje svih njegovih sustava, a osobito onih koji direktno utječu na emisije ispušnih plinova. Mogućnost izbora različitih radnih parametara motora s unutarnjim izgaranjem u svakom trenutku omogućava kvalitetniji pristup upravljanja sustavima za kontrolu ispušnih emisija i potpuno rješavanje njihovih najvećih problema u eksploataciji [2]. Naznačene su prednosti omogućene zbog visoke složenosti HEV sustava, a koja je i ujedno najveći nedostatak u smislu brojnosti sklopova i pronalaska optimalnog načina upravljanja koji predstavlja jedan od najvećih izazova. Više razine hibridizacije, odnosno potpuna hibridna električna vozila FHEV i hibridna vozila s mogućnosti napajanja iz električne mreže PHEV su još složenije jer dopuštaju veći broj stupnjeva slobode. Osnovne strategije upravljanja energijom su strategije povezane s upravljanjem u stvarnom vremenu, kao i globalna optimizacija koju je teško implementirati u stvarnom vremenu, ali je korisna u procjeni potrošnje goriva i emisija tijekom jednog ciklusa [17]. Unatoč tome što su razvijeni različiti

pristupi modeliranja klasičnih i hibridnih cestovnih vozila, čiji je detaljan pregled dan u drugom poglavlju ovog rada, pronalazak optimalnog rješenja složenih modela i dalje predstavlja veliki problem. Upotreba više izvora energije i visoka kompleksnost sustava pogona HEV zahtijeva složeniji sustav upravljanja na visokoj razini za što su potrebni složeni modeli u korisničkom i računalnom smislu. Modeliranje MSUI-ja u užem smislu kao i modeliranje sustava za kontrolu emisija, njihova nelinearnost, složeni međusobni utjecaji i ovisnost o velikom broju parametara, koji su detaljno elaborirani u objavljenom preglednom znanstvenom radu [2], čine fizikalne i analitičke modele presloženima. Zbog prethodno navedenog vrlo je teško implementirati pojedinačne modele svih komponenti MSUI-ja i svih sustava kontrole emisija kod modeliranja kompletnih hibridnih vozila pri čemu se javlja potreba za alternativnim modelima iz koje proizlaze ciljevi i hipoteza ovog doktorskog rada.

Glavni je cilj doktorskog rada predložiti novi model hibridnog vozila temeljen na modalnoj analizi energije, emisija i potrošnje goriva. Modalni pristup modeliranju podrazumijeva generiranje matrice ili mape koja povezuje izlazne vrijednosti modela, kao što su emisije, potrošnje goriva i potrošnje energije, s rasponima ulaznih varijabli koje opisuju ponašanje vozila. Na taj način se izlazne varijable modela raščlanjuju prema rasponima ili modovima ulaznih varijabli. Ukupne emisije vozila se dobivaju iz produkta određenog obrasca ponašanja i udjela provedenog unutar određenog svakog raspona. Ta bi metoda trebala omogućiti brži i lakši dolazak do unaprijed postavljenog cilja optimizacije HEV-a, ili se može koristiti kao smjernica koja klasični fizikalni model vodi do optimalnog rješenja izbjegavajući lokalne minimume. Također, predloženi model bi trebao zadržati prednosti modalnih emisijskih modela u smislu što manjeg broja unutarnjih varijabli, što mu osigurava upotrebu u grupnim procjenama emisija. Model se temelji na stvarnim emisijama vozila, potrošnji goriva i energije koji su mjereni u stvarnim uvjetima vožnje prema RDE pravilima koja su danas obvezni segment procesa tipskog odobrenja svakog vozila.

Hipoteza znanstvenog istraživanja u doktorskome radu je sljedeća:

- Na temelju modalne analize te definiranog toka energije prema funkciji moguće je formirati inovativni model hibridnog električnog vozila u frekvencijskoj domeni koji povezuje uzdužnu dinamiku vozila i energetske tokove s potrošnjom goriva, učinkovitošću i pojedinačnim emisijama vozila.

1.2. Znanstvene metode i znanstveni doprinos

Cjelokupno znanstveno istraživanje obuhvaćeno doktorskim radom, prikazano Tablicom 1, usmjereno je rješavanju problema zadovoljavanja strogih emisijskih propisa i CO₂ emisija u stvarnim uvjetima upotrebe i u cjeloživotnoj eksploataciji. Istraživanje je rezultiralo objavom šest radova na međunarodnim znanstvenim konferencijama te četiri znanstvena rada u A kategoriji. Radovi [3] i [4] su potvrdili hipotezu, dok su radovi [1] i [2] kao i radovi na međunarodnim znanstvenim konferencijama te kvalifikacijski ispit, pridonijeli razumijevanju i usmjeravanju k potvrdi hipoteze rada. U Tablici 1 podebljanim su tekstom naglašeni zaključci i problemi koji su usmjeravali daljnje istraživanje, a plavom su bojom naglašeni objavljeni rezultati u časopisima A kategorije.

Tablica 1. Prikaz znanstvenog istraživanja.

AKTIVNOST	REZULTATI I ZAKLJUČCI ISTRAŽIVANJA
Pregledom literature utvrđeni su najveći izazovi vozila pokretani motorima s unutarnjim izgaranjem u cestovnom prometu	<ul style="list-style-type: none"> • Stroge emisijski propisi i ograničenja CO₂ emisija u stvarnim uvjetima upotrebe i u eksploataciji do kraja radnog vijeka • Povećanje učinkovitosti ključnih komponenti vozila pojedinačno • Razumijevanje rada sustava za kontrolu emisija i detekcija najvećih izazova • Analiza ponašanja sustava kontrole emisija u stvarnim uvjetima eksploatacije • Povećanje učinkovitosti raspolaganja energijom kompletnog vozila – HEV, veliki problem predstavljaju složeni načini predviđanja emisija
Povećanje učinkovitosti ključnih komponenti vozila pojedinačno	<ul style="list-style-type: none"> • Najveći potencijal je utjecaj na učinkovitost motora s unutarnjim izgaranjem • Primjena CFD 1D/QD modela u testiranju koncepta smanjenja gubitaka izmjene radne tvari benzinskog atmosferskog motora s direktnim ubrizgavanjem goriva u cilindar • Rezultati pokazuju porast učinkovitosti kod niskih opterećenja na razini Atkinson i Miller ciklusa koji su već u širokoj upotrebi; mogućnost ispitivanja na prednabijanim motorima; CFD modeli nisu prikladni kao komponente modela kompletnog vozila
Razumijevanje rada sustava za kontrolu emisija, njihovo poboljšanje i utjecajni parametri	<ul style="list-style-type: none"> • Istraživanje utjecajnih čimbenika na emisije i na učinkovitost sustava za njihovu kontrolu • Izrada preglednog rada o svim komercijalno dostupnim sustavima za kontrolu emisija • Nužnost sustavnog pristupa koji razmatra zajednički učinak svih podsustava vozila. Dane su smjernice dostizanja emisijskih propisa i konceptualna usporedba mogućih kombinacija različitih sustava s aspekta kontrole emisija, potrošnje goriva, održavanja, veličine i cijene izvedbe • Potreba za istraživanjem utjecaja kvara pojedinih sustava na količine emisija u stvarnim uvjetima upotrebe.

	<ul style="list-style-type: none"> • Teško ostvarivi ciljevi sljedećih propisa bez upotrebe hibridnih pogonskih sustava • Vrlo složeni fizikalno-empirijski modeli sustava kontrole emisija
<p>Analiza ponašanja sustava kontrole emisija u stvarnim uvjetima eksploatacije</p> <p>Predstavljanje modalnog modela HEV-a na osnovi modalnih emisija.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Istraživanje utjecaja zakazivanja komponenti za kontrolu emisija na njihovu količinu • Eksperimentalno istraživanje količine emisija u stvarnim uvjetima upotrebe na vozilima s ispravnim i neispravnim sustavima za kontrolu emisija • Količine NO_x emisija iznad važećeg praga kod novijih vozila, višestruko povećanje svih emisija osim CO₂ u slučajevima kvarova komponenti. CO emisije kod dizelskih vozila ispod zakonskog praga i u slučaju kvara oksidacijskog katalizatora. • Prijedlog načina kontrole uređaja za kontrolu emisija u sklopu redovnih TP bez investicija u novu opremu. • Na osnovi izmjerenih podataka predstavljen modalni model klasičnog i HEV te predstavljen maksimalni potencijal učinaka hibridizacije ispitivanog vozila
Validacija novog modela HEV-a	<ul style="list-style-type: none"> • Određivanje performansi i upotrebljivosti novog modalnog modela • Izrada novog modela klasičnog i HEV na osnovi eksperimentalnih podataka te izrada kontrolnog fizikalnog modela klasičnog i HEV te njihova usporedba • Novi model HEV pokazuje znatno bolje rezultate u usporedbi s modalnim modelima HEV obrađenih u literaturi
Procjena emisija HEV-a pomoću kontinuirane raspodjele vjerojatnosti	<ul style="list-style-type: none"> • Analitička formulacija primjene kontinuirane raspodjele vjerojatnosti u izradi modalnih emisijskih modela • Primjena modela na općeniti model HEV-a

Metode i tijek istraživanja po fazama prikazani su na slici 1. Pregledom literature utvrđeno je da su dugoročni planovi smanjenja emisija CO₂ i nadolazećih emisijskih propisa najveći izazov opstanka MSUI-ja u cestovnim vozilima. U prvom koraku istraživanja primijenjen je numerički model motora sa svrhom ispitivanju koncepta povećanja ukupne učinkovitosti benzinskog MSUI-ja kroz povećanje učinkovitosti izmjene radne tvari. Potvrđena je hipoteza o značajnom povećanju učinkovitosti primjenom novog koncepta, ali bez značajnih prednosti u odnosu na metode koje su već u komercijalnoj upotrebi. Istraživanje je pokazalo da je visoka razina složenosti CFD modele MSUI-ja čini neprikladnima u modeliranju vozila, čime je istraživanje usmjereno prema jednostavnijim emisijskim modelima vozila. Druga faza istraživanja je inicirana problemima količina emisija i potrošnje goriva u stvarnim uvjetima upotrebe, odnosno problemima u eksploataciji i problemima njihova predviđanja. Napravljen je pregled literature iz područja formiranja emisija i sustava kontrole emisija s naglaskom na sustave najproblematičnijih emisija dizelskih vozila u svrhu razumijevanja njihova ponašanja kod izrade modela i u eksploataciji. Istraživanje upućuje na vrlo složena ponašanja sustava kontrole emisija u uvjetima stvarne eksploatacije i gotovo nemoguće zadovoljavanje graničnih

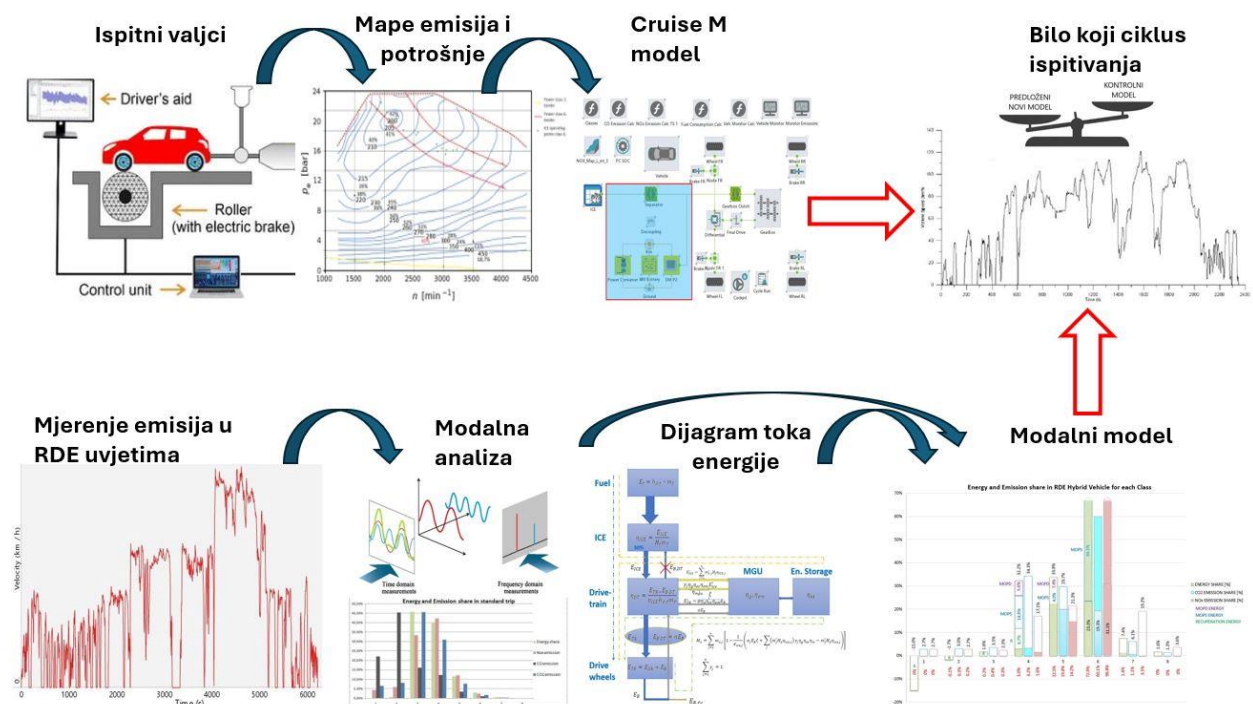
vrijednosti sljedećih emisijskih propisa bez upotrebe hibridnih pogonskih sustava. Treća faza istraživanja uključuje eksperimentalna mjerenja emisija i ključnih parametara vozila te njihovu obradu. Osnovna je svrha analiza problema emisija u trajnoj eksploataciji i prijedlog izrade modalnih emisijskih modela klasičnih i hibridnih vozila. Četvrta faza istraživanja se isključivo odnosi na validaciju predloženih modela i načine njihova daljnjeg poboljšanja što je ključni dio hipoteze ovog rada. Ovaj dio istraživanja je detaljnije objašnjen u daljnjem izlaganju.



Slika 1. Metode i faze istraživanja.

U svrhu potvrđivanja postavljene hipoteze izrađen je novi model vozila temeljen na modalnoj analizi, izvršeno je vrednovanje modela određivanjem odstupanja od stvarnih vrijednosti u različitim ciklusima vožnje. Najrelevantniji postupak bila bi usporedba rezultata s rezultatima mjerenja stvarnog hibridnog električnog vozila u različitim ciklusima vožnje. Osnovni je nedostatak ovakvog postupka visoka cijena opreme i same provedbe mjerenja. Zbog navedenog je primijenjen alternativni i znatno složeniji postupak koji je shematski prikazan na slici 2., prema kojem je provedena usporedba s klasičnim modelom hibridnog električnog vozila razvijenom u AVL-ovom programskom paketu CruiseM. S obzirom na tok energije i informacija, CruiseM model je formiran kao unapredni (*engl. Forward*) kvazistatički model. Pojedini sklopovi opisani su karakterističnim fizikalnim veličinama dok se procjena emisija i potrošnje goriva zasniva na pripadajućim mapama. Mape potrošnje goriva i emisija definirane su u ovisnosti o statičkim radnim točkama motora s unutarnjim izgaranjem i dobivene su mjerenjem na mjernim valjcima u laboratorijskim uvjetima.

Modalni model je formiran kao unatrag (engl. *Backward*) kinematički model prema analizi rezultata mjerenja potrošnje goriva, emisija i trenutne snage u stvarnim uvjetima vožnje u skladu s RDE procedurom. U istim uvjetima verificiran je i klasičan CruiseM model. Model je formiran diskretnom analizom učestalosti izmjerenih emisija i potrošnje goriva unutar određenih raspona pogonske snage. Polazna je pretpostavka da su odnosi količina pojedinačnih emisija prema jediničnoj pogonskoj energiji približno jednaki unutar promatranog raspona snage, bez obzira na vozni ciklus. To znači da su vrijednosti pojedinačnih specifičnih emisija ili potrošnje goriva po jedinici mehaničke energije j-tog razreda jednake omjeru ukupne količine emisija ili potrošnje goriva razreda i njegove ukupne energije. Razred snage podrazumijeva promatrano područje raspona snage između njene, unaprijed definirane, minimalne i maksimalne vrijednosti. Za svaki ispitni ciklus vožnje moguće je odrediti učestalost pojave svakog razreda snage i njegovu potrebnu pogonsku energiju, a time i količinu emisija i potrošnju goriva.



Slika 2. Proces izrade i vrednovanja modela.

Oba su modela, pod istim uvjetima s istim komponentama hibridizirana u paralelno hibridno električno vozilo, složeni CruiseM fizikalni kontrolni model i novi modalni model. Budući da klasična, nehibridna, vozila imaju samo jedan stupanj slobode, relativno je jednostavno model primijeniti na pojedini ciklus, dok je za hibridna vozila potrebno definirati strategiju upravljanja

na najvišoj razini. Zbog jednostavnosti implementacije i kasnije usporedbe rezultata odabrana je strategija upravljanja energijom temeljena na pravilima jer se kao takva može upotrijebiti na oba modela. Budući da je CruiseM model daleko složeniji po broju varijabli i parametara, primijenjena strategija upravljanja prilagođena je njegovim postavkama dok novorazvijeni modalni model oponaša tu strategiju. Na kraju su uspoređeni dobiveni rezultati oba modela, novorazvijeni VSP (*engl. Vehicle Specific Power*) modalni model s CruiseM modelom na klasičnom i hibridnom vozilu u realnim uvjetima upotrebe RDE te u NEDC i WLTC ciklusima.

Izvorni znanstveni doprinosi ovog doktorskog rada su sljedeći:

- Razvoj i vrednovanje novog modela klasičnog i hibridnog električnog vozila temeljenog na modalnim emisijama koji obuhvaća procjenu potrošnje goriva, emisija, potrebne snage pogonskih komponenti i potrebne energije.
- Procjena emisija i potrošnje goriva vozila primjenom globalne strategije upravljanja energijom temeljene na pravilima na predloženom modelu hibridnog električnog vozila u različitim ciklusima vožnje.
- Procjena utjecaja stvarnih uvjeta upotrebe i trajne eksploatacije vozila na emisije i ponašanje sustava kontrole emisija.

1.3. Objavljeni radovi na kojima se temelji doprinos

Doktorski rad predstavlja osnovu i pregled četiri objavljena znanstvena rada na kojima se temelji doprinos zajedno sa zaključcima koji iz njih proizlaze. Objavljeni znanstveni radovi na kojima se temelji doprinos disertacije su sljedeći:

[1] A. Kozina, G. Radica, S. Nižetić, "Increasing engine efficiency at part load with the exhaust valve control: A simplified modelling approach", *International journal of exergy*, 26 (2018), 1/2; 131-152 doi:10.1504/IJEX.2018.092510

[2] A. Kozina, G. Radica, S. Nižetić, "Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from Diesel engines ", *Journal of cleaner production*, 262 (2020), 1-20 doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121105

[3] A. Kozina, G. Radica, S. Nižetić, "Emission analysis of Diesel Vehicles in circumstances of emission regulation system failure: A case study", *Journal of energy resources technology*, 144 (2021), 8; 082307, 13 doi:10.1115/1.4053070

[4] A. Kozina, T. Vidović, G. Radica, A. Vučetić, "A New Vehicle-Specific Power Model for the Estimation of Hybrid Vehicle Emissions", *Energies* 2023, 16, 8094. <https://doi.org/10.3390/en16248094>

1.4. Pregled organizacije disertacije

Motivacija i hipoteze istraživanja predstavljene su u uvodnom dijelu doktorskog rada. Predstavljene su metode istraživanja i izvorni znanstveni doprinosi, dok je na kraju uvodnog poglavlja dan popis objavljenih znanstvenih radova na kojima se temelji doprinos disertacije. Drugo poglavlje obuhvaća pregled postojećeg eksperimentalnog i analitičkog istraživanja iz područja sustava kontrole emisija, modeliranja emisija, modeliranja klasičnih i hibridnih vozila, upotrebe modalne analize u emisijskim modelima klasičnih i hibridnih vozila i dijagrame toka energije. Objavljeni pregledni rad na kojem se temelji dio ukupnog doprinosa također je dio poglavlja u kojima su analizirana dosadašnja istraživanja. Poglavlje završava zaključkom kako je nedovoljno istraženo područje emisija i emisijskih modela klasičnih i hibridnih vozila, s obzirom na postojeće znanstvene spoznaje. U trećem poglavlju dan je detaljan osvrt na eksperimentalna istraživanja doktoranda. U četvrtom poglavlju dan je pregled objavljenih radova na kojima se temelji doprinos s istaknutim pojedinačnim doprinosima, kao i s doprinosima doktoranda na svakom od radova. Peto poglavlje daje zaključke doktorskog rada te smjerove budućih istraživanja. Priložena je korištena literatura u istraživanju i na kraju su priloženi znanstveni radovi na kojima se temelji doprinos disertacije.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA IZ PODRUČJA RADA

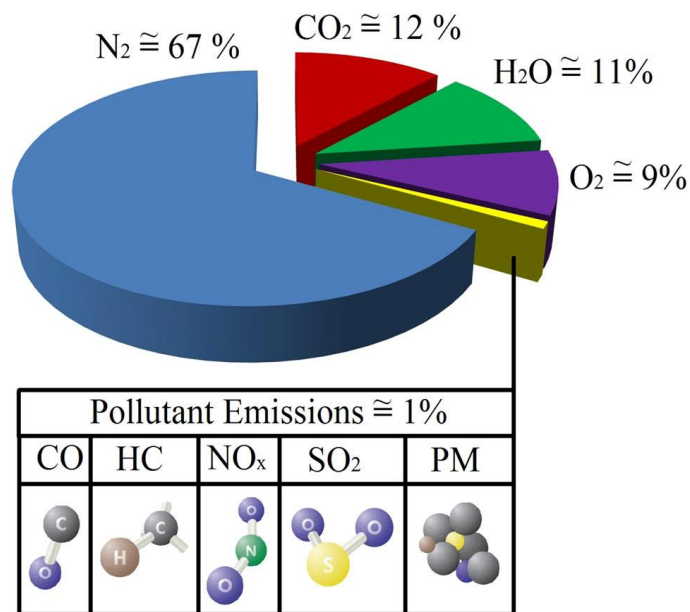
Modeliranje cjelokupnog vozila zahtjevan je proces kojim se obuhvaća široko područje istraživanja s nekoliko ključnih elemenata. Najsloženiji dio modela vozila je model motora s unutarnjim izgaranjem u širem smislu kao i njegovi emisijski modeli. Emisijski modeli i modeli potrošnje goriva vozila uvjetovani su složenim predviđanjem s jedne strane i ograničenim brojem varijabli koja im ograničava širinu upotrebe s druge strane. Zbog izrazite prednosti u vidu količine varijabli i jednostavnosti primjene, modalni emisijski modeli vozila vrlo se često koriste u pojedinačnim i grupnim procjenama emisija i potrošnje goriva vozila. Najveći je nedostatak ove grupe modela ograničena točnost, osobito kod novijih generacija pogonskih sustava koji uključuju sustave kontrole emisija osjetljive na dinamiku vožnje i hibridne pogonske sustave s visokim razinama hibridizacije. Kod hibridnih vozila zbog specifičnosti rada motora s unutarnjim izgaranjem i pogonskih elemenata sekundarnog izvora energije formiranje modela se dodatno komplicira, te uvjetuje uvođenje tokova energije unutar modela. Iz prethodno navedenog pregledno poglavlje, osim šireg područja modeliranja emisija i potrošnje goriva klasičnih i hibridnih vozila, obuhvaća modalne emisije, obuhvaća poglavlje o nastanku emisija i sustavima za njihovu kontrolu te dijagrame toka energije HEV-a.

2.1. Emisije, modeli emisija i sustavi za njihovu regulaciju

Kako bi se ispunili zahtjevi novijih emisijskih propisa i istovremeno povećala učinkovitost motora, motori s unutarnjim izgaranjem postaju sve složeniji sa sve većim brojem upravljačkih sustava i sustava za kontrolu emisija. U preglednom radu [2] analizirane su različite metode i sustavi kontrole emisije motora s unutarnjim izgaranjem, posebice tehnike recirkulacije ispušnih plinova koje reguliraju emisije tijekom njihovog stvaranja, kao i tehnike naknadne obrade ispušnih plinova pomoću različitih vrsta katalitičkih pretvarača i filtriranje čestica. Također se objašnjavaju problemi odstupanja od postojećih emisijskih propisa i načini njihova ispunjavanja. Analizirani su mehanizmi nastanka pojedinih emisija i njihova povezanost s parametrima rada motora. Objašnjeni su problemi koji su se javljali pri korištenju pojedinih metoda za smanjenje emisija u specifičnim radnim uvjetima motora. Istražen je utjecaj sustava

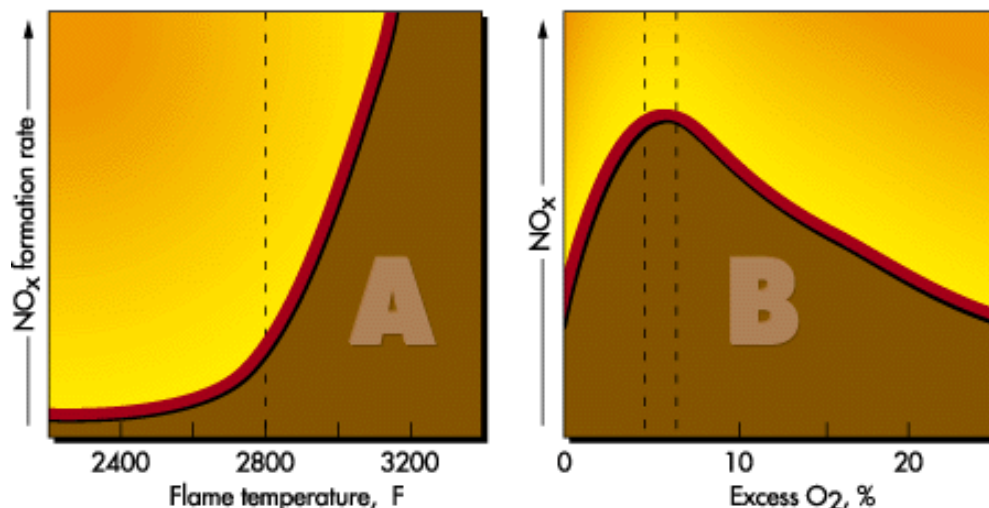
za kontrolu emisija na parametre rada motora, njegovu trajnost kao i na potrošnju goriva odnosno emisija CO₂.

Idealnim izgaranjem 1 kg dizelskog goriva nastaje približno 3,1 kg CO₂ i 1,3 kg vodene pare uz oslobađanje topline. Osim vode i ugljikovog dioksida, tijekom izgaranja goriva u motoru nastaje i oko 1 % štetnih tvari u obliku plinova i sitnih čestica od kojih najznačajniji količinski utjecaj na zdravlje ljudi imaju različiti oksidi dušika, NO_x, sitne čestice, PM, ugljikov monoksid, CO, neizgorjeli ugljikovodici, HC i sumporov dioksid, SO₂. Približne volumne udjele produkata izgaranja prikazuje slika 3.



Slika 3. Prosječni sastav ispušnih plinova dizelskog motora [18].

Mehanizam nastajanja **emisija NO_x-a** je gotovo isključivo vezan za temperaturu izgaranja, pretičak kisika i vrijeme trajanja visokih temperatura izgaranja (> 1600 °C) [19], čiji su trendovi prikazani dijagramom na slici 4.



Slika 4. Formiranje NO_x emisija u ovisnosti o temperaturi izgaranja i pretičku kisika [20].

Definirana su četiri mehanizma nastajanja NO_x [21]: „prompt“ mehanizam, termalni mehanizam, stvaranje NO_x preko N₂O i stvaranje NO_x iz dušika korištenog kao gorivo. U dizelskim motorima stvaranje NO primarno se odvija termalnim mehanizmom na koji se odnosi većina korištenih modela. Čisti empirijski modeli temelje se na korelaciji između operativnih parametara motora kao što su temperatura i tlak u cilindru na emisije NO_x-a. Empirijski NO_x modeli valjani su samo za uski raspon operativnih uvjeta i ne mogu predvidjeti vrijednosti izvan kalibracijskog raspona. U analitičkim modelima uzima se u obzir kemijski mehanizam stvaranja NO_x. Ovi modeli predviđaju NO_x u širem rasponu operativnih uvjeta za različite tipove/konfiguracije motora. Analitički modeli najčešće se koriste u kombinaciji s dvozonskim ili višezonskim modelima izgaranja, pretpostavljajući jednolik tlak u cilindru. Svaka zona tretira se kao jedan termodinamički sustav s određenom temperaturom i sastavom plinova. Koncentracija pojedine komponente izračunava se koristeći detaljan kemijski mehanizam. Ovaj model koristi tzv. prošireni Zeldovichev mehanizam [22] za stvaranje NO koji je dominantan nad ostalim oksidima dušika. Osim empirijskih i analitičkih modela postoje i statistički modeli koji koriste direktno usrednjene podatke mjerene u prometu [23] ili te iste podatke koriste za treniranje različitih neuralnih mreža [24].

Čestice čađe nastaju zbog nepotpunog izgaranja goriva, tako veće emisije čađe upućuju na neadekvatno izgaranje i lošu učinkovitost [25]. Čestice čađe uglavnom su sastavom čisti ugljik, s nekim organskim spojevima adsorbiranim na njihovim površinama, poput aromatskih spojeva i neizgorenih ugljikovodika [26]. Promjer čestica kreće se od 15 do 30 nm pri temperaturi ispuha većoj od 500 °C. Ispod 500 °C ugljikovodici velike molekulske mase se adsorbiraju na česticama, uzrokujući povećanje njihove veličine [27]. Na formiranje čađe utječu tlak,

temperatura i pretičak zraka, u dizelskim motorima se ono događa u temperaturnom rasponu od 1000 do 2800 K i tlakovima od 50 do 100 bar, s dovoljno zraka za cjelovito izgaranje goriva [28]. Formiranje čađe u osnovi je složen proces prijelaza iz plinovite u čvrstu fazu, koji se završava u nekoliko milisekundi. Sastav goriva i nečistoće također utječu na formiranje čađe u motorima s kompresijskim paljenjem. Ako gorivo sadrži značajniju količinu sumpora on povećava masu čestica tako što oksidira u SO_2 koji se apsorbira na susjednim česticama čađe i reagira s ugljikovodicima [29]. Povećanje omjera ugljika prema vodiku u gorivu dovodi do većeg broja čestica čađe, a smanjuje se s porastom udjela kisika u gorivu [30]. Generiranje vrtloga povećava turbulenciju u komori izgaranja i ubrzava brzinu izgaranja što rezultira smanjenjem količine čestica čađe. Ranije ubrizgavanje smanjuje formiranje čađe, dok zakašnjelo povećava [31]. Veće količine čestica nastaju pri nagloj promjeni opterećenja motora, odnosno u dinamičnim uvjetima vožnje. Metoda višestrukog ubrizgavanja učinkovita je u ograničavanju formiranja čađe [32] jer vremenski razmak između dva ubrizgavanja omogućuje ulazak svježeg zraka u mlaz spreja, povećavajući lokalni pretičak zraka.

Hiroyasu je dao jednostavnu formulaciju za izračunavanje brzine formiranja mase čađe koja se dobije razlikom između brzine formiranja i brzine oksidacije čađe tijekom izgaranja [33]. Nagle, Strickland i Constable proširili su Hiroyasuov model tako da su u oksidaciji čađe uzeti u obzir raspored i lokacija ugljikovih atoma na površini čestica čađe. Mjesta su podijeljena na reaktivnija mjesta i manje reaktivna mjesta. Kako temperatura raste, manje reaktivna mjesta prelaze u reaktivnija mjesta; empirijske jednadžbe dane su u [34]. Ovi empirijski modeli ne uzimaju u obzir detaljne informacije o mehanizmu formiranja čađe i neovisni su o vrsti goriva, također fronta predviđena ovim modelom ne slaže se sa strukturom plamena u blizini mlaznice [35]. Stoga, detaljne informacije o formiranju predviđene čađe znaju odstupati od mjerenih rezultata. Navedeni su modeli vrlo popularni u akademskoj zajednici zbog jednostavnosti implementacije u već postojeća programska rješenja.

Emisije ugljikova monoksida iz motora s unutarnjim izgaranjem kontroliraju se prvenstveno omjerom zraka i goriva [36]. Kod bogate smjese koncentracije CO u ispušnim plinovima kontinuirano rastu s opadanjem omjera zraka i goriva, odnosno kako se povećava količina viška goriva. Za smjese siromašne gorivom koncentracije CO u ispušnim plinovima malo variraju i niske su, reda veličine promila molarnog udjela. Budući da benzinski motori često rade blizu stehiometrijskog omjera, pri djelomičnom opterećenju, a ovisno o modelu mogu koristiti bogatu smjesu pri visokim opterećenjima; emisije CO su značajne i potrebno ih je kontrolirati. Također, zbog potrebe za obogaćivanjem smjese kada je motor hladan, emisije

CO tijekom zagrijavanja motora u pravilu su značajno veće nego emisije u potpuno zagrijanom stanju. Tijekom prijelaznih opterećenja motora i tijekom ubrzanja i usporavanja kontrola doziranja goriva ključna je u količini CO emisija. Tako da količina CO emisija tijekom dinamičnih uvjeta vožnje može biti značajno veća nego kod stacionarnog opterećenja. S druge strane, dizelski motori uvijek rade s velikim viškom zraka te posljedično emisije CO iz dizelskih motora su relativno niske. Razine CO opažene u ispušnim plinovima benzinskih motora niže su od maksimalnih vrijednosti izmjerenih unutar komore za izgaranje, ali su značajno više od ravnotežnih vrijednosti. Na temelju toga može se zaključiti da su procesi koji upravljaju razinama CO u ispušnim plinovima kinetički kontrolirani [37]. Modeli predviđanja CO temelje se na analitičkom opisu brzina reakcije CO s hidroksilnim radikalom OH i brzine oksidacije CO s okolnim kisikom. Budući da se najveća koncentracija CO emisija (80-90 %) u odnosu na cijeli ciklus ispušta prilikom hladnog starta, razvijeni su mnogi specijalizirani modeli koji razmatraju emisije upravo u tom području. U [38] predstavljen je detaljan fizikalni model katalizatora koji se sastoji od 13 kemijskih reakcija i 9 reakcija za pohranu kisika. U [39] razmatra se kemijska pretvorba ugljikovog monoksida i neizgorjelih ugljikovodika u procesu oksidacije uz detaljno modeliranje prijenosa topline koji su ključni kod procjene učinkovitosti katalizatora.

U benzinskim motorima **neizgorjeli ugljikovodici, HC** mogu imati različite načine formacija te je stoga vrlo teško pružiti cjelovit opis njihova procesa nastajanja, pogotovo u 1D ili kvazidimenzionalnim uvjetima. Ipak, postoje fenomenološki modeli koji uzimaju u obzir glavne mehanizme nastajanja i predviđaju trendove nastanka ugljikovodika kao funkciju radnih parametara motora. Prema [40] glavni su izvori neizgorjelih ugljikovodika sljedeći:

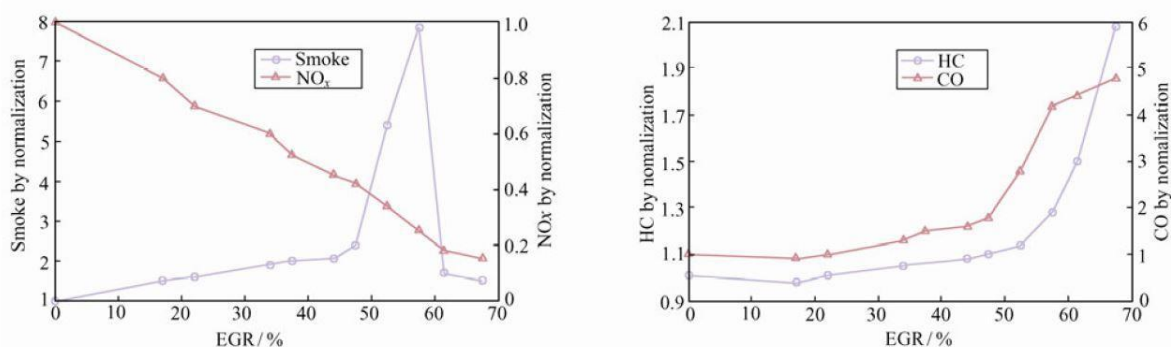
1. Dio smjese ulazi u mikropraznine unutar cilindra i ne izgara u potpunosti.
2. Pare goriva apsorbiraju se u sloj ulja i talože na stijenkama cilindra tijekom usisa i kompresije. Sljedeća desorpcija događa se kada tlak u cilindru padne tijekom ekspanzije, što onemogućava potpuno izgaranje.
3. U blizini stijenke cilindra plamena se fronta prijevremeno gasi zbog gubitka topline na stijenkama, ostavljajući tanak sloj neizgorene mješavine goriva i zraka.
4. Izravan protok pare goriva u ispušni sustav tijekom preklapanja ventila.

Prva dva mehanizma smatraju se najvažnijima i trebaju biti uzeti u obzir u termodinamičkim modelima. Kako su opisani učinci vezani za samu geometriju komore izgaranja, ne mogu se

fizikalno opisati u kvazidimenzionalnom pristupu, ali se mogu uključiti usvajanjem prilagodljivih poluempirijskih korelacija.

U daljnjem su razmatranju naglašeni samo osnovni principi djelovanja i uži problemi vezani za daljnje istraživanje modeliranja, utjecaja na emisije u različitim uvjetima upotrebe i utjecaja kvara sustava, dok je u preglednom radu [2] obrađeno široko područje regulacije emisija. Generalno sustave kontrole emisija možemo podijeliti na one koji djeluju u mjestu nastanka, kao recirkulacija ispušnih plinova, i one koji djeluju na postojeće emisije, kao što su katalitički pretvarači i filtri čestica.

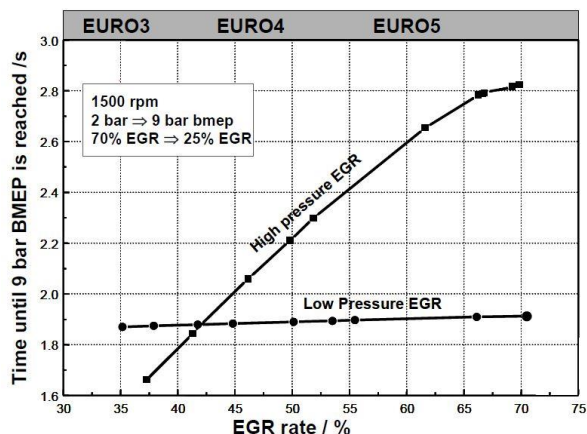
Recirkulacija ispušnih plinova (engl. *Exhaust Gas Recirculation, EGR*) je najčešća tehnologija za smanjenje emisije NO_x u motorima s unutarnjim izgaranjem. Recirkulirani plinovi smanjuju vršne temperature izgaranja unutar komore za izgaranje potrebne za stvaranje NO_x emisija [41]. Niže vršne temperature izgaranja posljedica su usporavanja izgaranja i većeg toplinskog kapaciteta ispušnih plinova u odnosu na svjež zrak koji zamjenjuju. Osim pozitivnog utjecaja na NO_x emisije, EGR negativno utječe i na PM, CO i HC emisije ovisno o udjelu, kako je prikazano na slici 5.



Slika 5. Utjecaj EGR-a na NO_x , PM, HC i CO emisije [42].

EGR tehnologija se osim u svrhu smanjenja NO_x emisija, kod benzinskih motora, koristi za smanjenje gubitaka usisa i smanjenje vjerojatnosti nastanka detonantnog izgaranja. Učinak EGR-a se najčešće izvodi povratom iz ispušnog kolektora kao visokotlačni HP-EGR, povratom plinova nizstrujno od turbopunjača kao niskotlačni LP-EGR ili interno unutar same komore izgaranja prikladnim odabirom preklapanja ventila. Prema [43] porast količine visokotlačnog HP-EGR-a pomiče radnu točku turbopunjača prema nižoj učinkovitosti sa smanjenim protokom zraka uz smanjenje brzine turbopunjača i povećanje vremena odziva na promjenu opterećenja. Utjecaj ovisi o karakteristikama cjelovitog ispitivanog sustava, o tipu recirkulacije i o trenutnoj količini recirkuliranih plinova. U [43] je pokazana ovisnost vremena odziva s 2 bar na 9 bar srednjeg

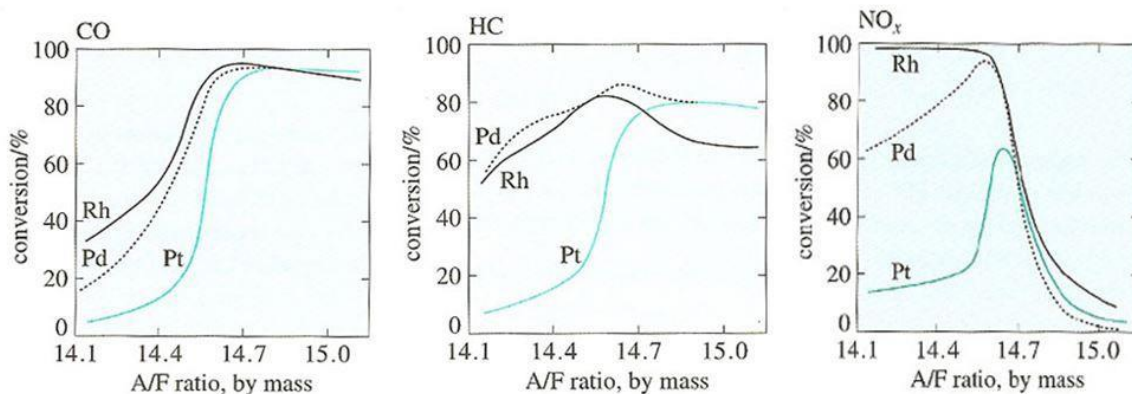
efektivnog tlaka o količini recirkuliranih plinova koja je povezana s odgovarajućim emisijskim propisom, slika 6.



Slika 6. Odziv motora kod različitih euro propisa za HP i LP EGR [43].

Tijekom vremena odziva kao i kod visokih opterećenja EGR se u pravilu potpuno zatvara što uzrokuje značajno povećanje emisija u dinamičkim uvjetima vožnje. Povećanje omjera LP/HP EGR ima pozitivan učinak na vrijeme odziva motora pri niskom i dinamičkom opterećenju [44, 45], što je posebno bitno u cestovnim vozilima. Najveći je nedostatak HP-EGR sustava korištenje nepročišćenih ispušnih plinova zbog čega je većina kvarova uzrokovana taloženjem čađe koja se nakuplja u EGR ventilu, hladnjacima i usisnom kolektoru.

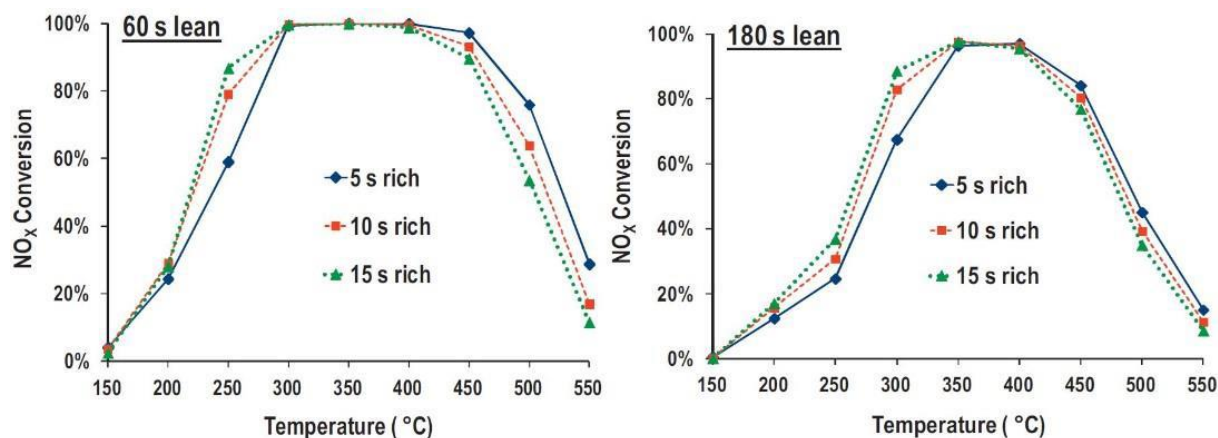
Katalizator trostrukog djelovanja je najčešće korišteni sustav za kontrolu emisija, njegova je najveća prednost što se oksidacija ugljikovog monoksida, oksidacija ugljikovodika i redukcija dušikovog oksida odvijaju istovremeno. Ima visoku učinkovitost u uskom području omjera zrak/gorivo (*engl. Air to Fuel Ratio, AFR*) i pri visokim radnim temperaturama [46]. Utjecaj omjera zraka i goriva na učinkovitost prikazana je dijagramom na slici 7.



Slika 7. Učinkovitost različitih katalizatora na redukciju CO, HC i NOx u funkciji AFR-a[42].

U području siromašne smjese potpuno izostaje redukcija NO_x -a tako da nisu pogodni za dizelske i benzinske motore sa slojevitim ubrizgavanjem koji u svrhu eliminacije NO_x koriste selektivnu katalitičku redukciju, katalizatore u uvjetima siromašne smjese i njihove kombinacije.

Katalizator dušikovih oksida u uvjetima siromašne smjese (engl. *Lean NO_x Trap, LNT*) sastoji se od oksidacijskog katalizatora, adsorbera za privremeno skladištenje NO_2 u uvjetima siromašne smjese i redukcijskog katalizatora [46]. Jedan od nedostataka je faza regeneracije koja se odvija u obogaćenoj smjesi i koja traje oko 2 do 5 sekundi u intervalima od 1 do 3 minute, što uzrokuje povećanje potrošnje goriva do 10 % [47]. Na učinkovitost pretvorbe utječe vrijeme provedeno u režimu siromašne smjese, vrijeme provedeno u režimu obogaćene smjese i radna temperatura [48]. Na slici 8. prikazan je utjecaj radnih režima i radnih temperatura na učinkovitost komercijalnog LNT katalizatora.

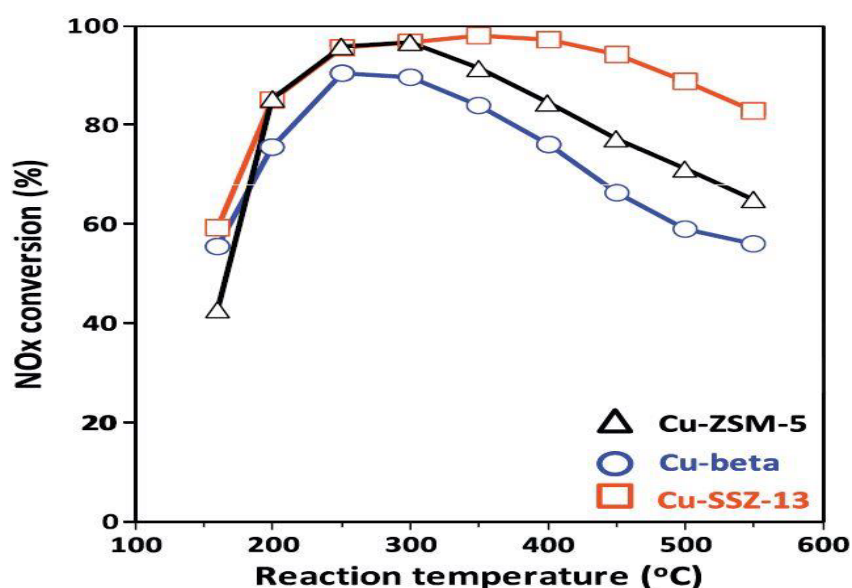


Slika 8. Stupanj učinkovitosti NO_x u LNT za period od 60 s i 180 s [47].

Toplinsko starenje i kontaminacija sumporom dva su glavna čimbenika koji dovode do pada performansi LNT katalizatora. Nakon kontaminacije sumporom potrebno je provesti proces desulfatizacije jedinice za skladištenje NO_x -a. Potpuna desulfatizacija zahtijeva znatno više temperature od normalnih radnih temperatura, iznad 650 °C u bogatoj smjesi, gdje se javlja problem termičkog starenja kojem je ovaj katalizator sklon. Unatoč nedostacima u vidu povećanja potrošnje goriva, osjetljivosti na nečistoće i podložnosti toplinskom starenju, buduća primjena LNT katalizatora zajamčena je nižom cijenom i manjim potrebnim prostorom za smještaj od ostalih sustava za redukciju NO_x -a u siromašnom režimu rada.

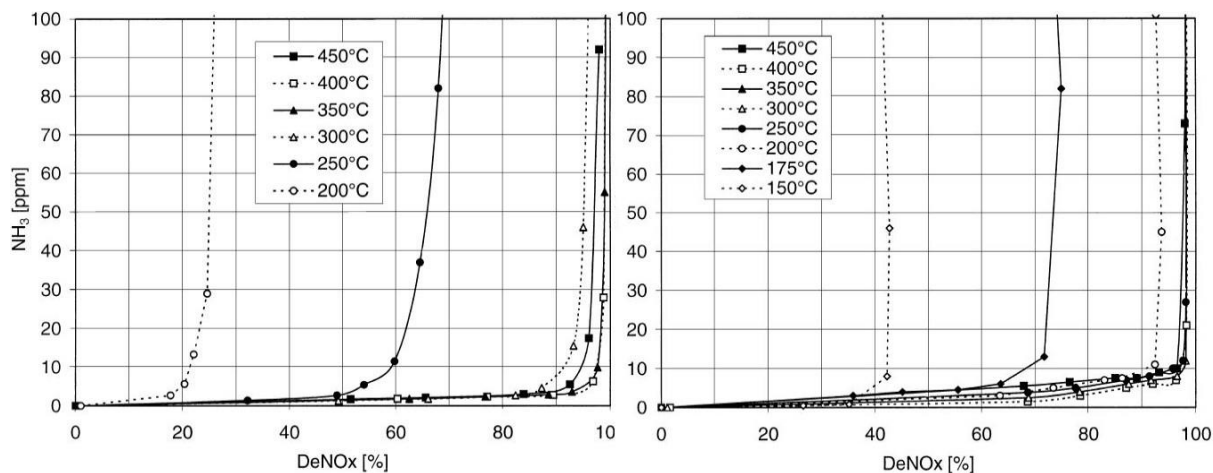
Selektivna katalitička redukcija (engl. *Selective Catalytic Reduction, SCR*) kombinira aktivnu kontrolu i katalizator koji reducira NO_x emisije dodavanjem vanjskog redukcijskog reagensa, koji je obično tekućina na bazi uree. Sastoji se od mješavine deionizirane vode i čiste

uree s udjelom od 32,5 % [49]. SCR katalizator postiže stopu pretvorbe NO_x između 80 i 95 % u normalnim uvjetima korištenja [50] i pokazuje visoku stabilnost u dugotrajnom radu [51], zbog čega ova tehnologija postavlja standarde u redukciji emisija NO_x u uvjetima rada motora sa siromašnom smjesom. Glavni su nedostaci SCR tehnologije visoka radna učinkovitost u uskim temperaturnim područjima jer učinkovito rade na temperaturama iznad $190\text{ }^\circ\text{C}$, veliki dodatni prostor koji zauzimaju sve komponente ovog katalizatora i dodatna tekućina koju treba dopunjavati [52]. Dijagram na slici 9. pokazuje vrlo visoku učinkovitost i jaku osjetljivost različitih SCR katalizatora na temperaturu, posebno u području niskih temperatura.



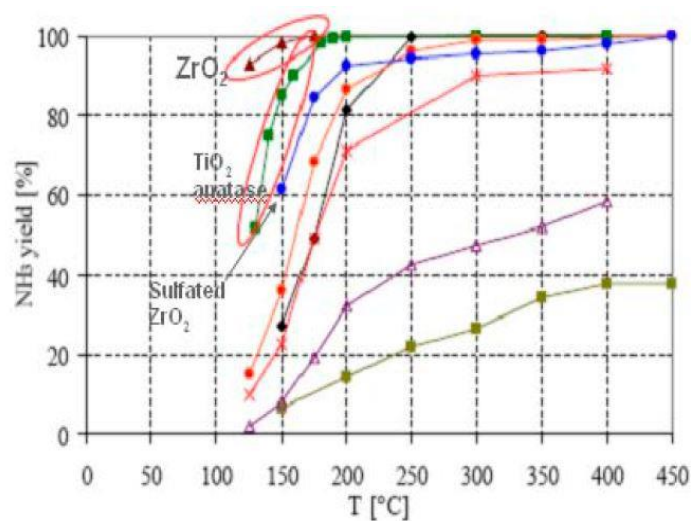
Slika 9. Temperaturna ovisnost redukcije NO_x za različite katalitičke materijale [53].

Jak utjecaj na povećanje učinkovitosti redukcije NO_x -a pri niskim temperaturama SCR katalizatora ima omjer NO_2/NO , slika 10. Pri $200\text{ }^\circ\text{C}$ i 10 ppm NH_3 , SCR s čistim NO ima učinkovitost od 21 % i s omjerom 1:1, njegova se učinkovitost pretvorbe povećava do 93 % [54]. Uobičajeni ukupni udio NO_2 u dušikovim oksidima dizelskih ispušnih plinova je samo 5-10 %. Taj se udio povećava korištenjem visokokvalitetnog platinastog oksidacijskog katalizatora koji je postavljen uzstrujno, ali ne rješava u potpunosti problem niskotemperaturne pretvorbe budući da su mu također potrebne povišene temperature za učinkovitu pretvorbu NO u NO_2 .



Slika 10. Učinkovitost redukcije NO_x: a) s čistim NO i b) s mješavinom NO₂/NO 1:1[54].

SCR za redukciju NO_x-a koristi amonijak koji se dobiva termolizom 32 % uree u katalizatoru uzlazno od SCR-a, čiji je zadatak i dekompozicija čvrstih produkata zaostalih iz nepotpune termolize za čiji su raspad bez prisutnosti katalizatora potrebne temperature od 600°C. Slika 11. prikazuje učinkovitost razgradnje uree u ovisnosti o temperaturi termolize za različite materijale katalizatora koji također spuštaju temperature dekompozicije krutih produkata između 200 °C i 290 °C [55].



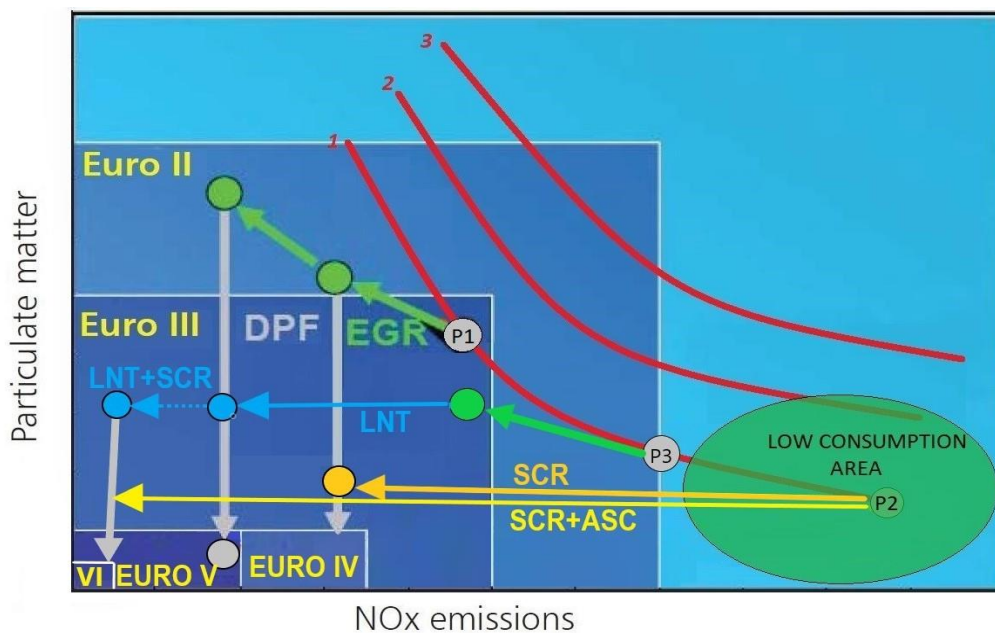
Slika 11. Utjecaj temperature termolize na učinkovitost razgradnje uree [55].

Kombinacija LNT SCR redukcijskih katalizatora NO_x-a ostvaruje prednosti u vidu visoke učinkovitosti, kompaktnosti i niže cijene zbog izostanka sustava ubrizgavanja i razgradnje uree jer je izvor amonijaka LNT katalizator u vremenu obogaćene smjese. Ovisnosti o radnim parametrima slične su kao u pojedinačnim sustavima i detaljno su objašnjeni u [2] kao i njihove konfiguracije, učinkovitosti, te problemi eksploatacije.

Filter čestica osnovni je sustav za smanjenje emisije čestica dizelskih motora (*engl. Diesel Particulate Filter, DPF*) ili kod benzinskih motora (*engl. Gasoline Particulate Filter, GPF*). Riječ je o mehaničkom filteru koji zaustavlja čestice iz ispušnih plinova, uključujući čvrsti ugljik (čađu) i fine čestice, dok ostatak ispušnih plinova prolazi kroz filter. Nakon određenog razdoblja korištenja filter je zasićen, stupanj onečišćenja se procjenjuje kao i kod standardnih mehaničkih filtera prema diferencijalnom tlaku između ulaza i izlaza filtera. Prema [56] povećanje protutlaka od 200 mbar dovodi do povećanja specifične potrošnje goriva za približno 2 %. Nakon što je filter zasićen česticama čađe do unaprijed određene granice, čestice se moraju ukloniti, odnosno regenerirati filter. Osim čestica čađe, filter zadržava i čestice pepela koje se regeneracijom ne mogu ukloniti pa je potreban servis filtera. Kod vozila u cestovnom prometu većinom se koristi kombinacija aktivne i pasivne regeneracije. Pasivna se regeneracije događa na nižim temperaturama, između 200 i 300 °C, reakcijom čestica čađe s NO₂; na ovaj način filter čestica sudjeluje u smanjenju emisija NO_x-a. Kvaliteta pasivne regeneracije, kao i učinkovitost redukcije NO_x-a, ovisi o količini raspoloživog NO₂ na čiju količinu utječe kvaliteta i temperatura uzstrujnog oksidacijskog katalizatora. Prema [57] uz korištenje aditiva za snižavanje temperature pasivne regeneracije kod komercijalnog nekataliziranog DPF-a učinkovitost redukcije NO₂ kretala se oko 44 %. Oksidacija čestica čađe u kisiku je vrlo spora reakcija pa je za aktivnu regeneraciju potrebna znatno viša temperatura od 550 °C do 600 °C, ili oko od 100 °C do 200 °C niže temperature kod korištenja kataliziranih filtera ili ubrizgavanjem katalizatora. Takve se temperature osiguravaju dodatnim izgaranjem goriva u oksidacijskom katalizatoru postavljenom uzstrujno. Posebno su opasne regeneracije kod jako velikih akumulacija čađe, jer pri visokim temperaturama i dovoljno kisika čađa vrlo brzo izgara i može podići temperaturu iznad 900 °C, unatoč aktiviranoj zaštiti od prekomjernih temperatura, što može uzrokovati trajna oštećenja DPF-a. Aktivna regeneracija zbog potrebe dodatnog grijanja utječe na povećanje potrošnje goriva za 2 do 3 %, dok se kod pasivne regeneracije taj utjecaj smanjuje za oko 80 % [58].

Na osnovi spoznaja o svim dostupnim sustavima kontrole emisija vozila, s fokusom na najproblematičnije emisije dizelskih vozila, razvijen je dijagram, prikazan na slici 12., koji jasno prikazuje načine postizanja različitih emisijskih razina. S gledišta najproblematičnijih emisija, linije 1, 2 i 3 predstavljaju tehnologije motora u užem smislu, bez ikakvih sustava za kontrolu emisije. Položaj i oblik linija uvjetovan je stupnjem razvoja motora u užem smislu, koji ovisi o različitim primijenjenim tehnologijama ubrizgavanja, prednabijanja, vrtloženja u komori izgaranja, izmjene radnog medija, omjera kompresije itd. Linija 1 predstavlja motor s

najvišim stupnjem razvoja, dok je položaj točaka P1, P2 i P3 određen trenutnim postavkama motora. Kako ograničenja CO₂ emisija i potrošnje goriva dolaze u prvi plan, polazišna su linija MSUI s najvišim stupnjem razvoja, podešeni prema najnižoj potrošnji goriva bez obzira na pojedine emisije. Korištenje efikasnih sustava kontrole emisija omogućava im zadovoljavanje različitih europskih propisa o graničnim vrijednostima emisija štetnih tvari u svim uvjetima upotrebe.



Slika 12. Učinak različitih tehnologija kontrole emisija u cilju dostizanja različitih emisijskih razina [2].

Rad [2] je obuhvatio različite tehnike i sustave čija je osnovna svrha kontrola ili smanjenje emisija štetnih tvari s naglaskom na najproblematičnije NO_x i PM emisije. Obradeni su gotovo svi poznati učinci utjecajnih parametara na svaki sustav pojedinačno, što je pridonijelo razumijevanju složenih fizikalnih i analitičkih modela ponašanja. Pregledom dosadašnjih istraživanja utvrđeno je iznimno složeno predviđanje svakog pojedinog sustava na pojedine emisije, ali i određeni nedostatak u području istraživanja zajedničkog djelovanja više podsustava koji čine cjelovito rješenje. Prema detaljnoj analizi postojećih tehnologija dane su smjernice s procjenom kvalitete rješenja u vidu usporedba različitih rješenja cjelovitih sustava kontrole emisija s aspekta učinka na najutjecajnije emisije, potrošnju goriva, održavanje, veličinu i cijenu izvedbe na slici 13.

Technical solution	Emissions						Packaging	Maintenance	Costs	Comments
	NO _x	PM/PN	CO ₂	NH ₃	CO	THC				
HP EGR Cooled 	BASELINE									Pure NO _x reduction potential. Commonly used up to Euro 6b. Failed in RDE.
High EGR combustion 	+	○	○	○	○	○	⊖	⊖	⊖	Insufficient NO _x reduction potential for future euro norms. Possible HEV application in smaller vehicles.
Lean NO _x Trap System 	++	○	⊖	⊖	○	○	⊖	⊖	⊖	Suitable for smaller vehicles. Sensitive to sulfur content in fuel. NO _x reduction potential affects fuel consumption.
SCR System 	+++	○	+	⊖	○	○	⊖	⊖	⊖	Very robust and large system. Suitable for highly and medium loaded engine in large vehicles.
Close-coupled SCR/ASC System 	++++	○	++	○	○	○	⊖	⊖	⊖	Very efficient NO _x reduction system also suitable for low loaded engine. Able to meet all future standards of harmful emissions, especially in combination with HEV.
	+ -better than baseline ○ -same as baseline ⊖ -worse than baseline ○ -same as baseline, fully satisfied requirements									

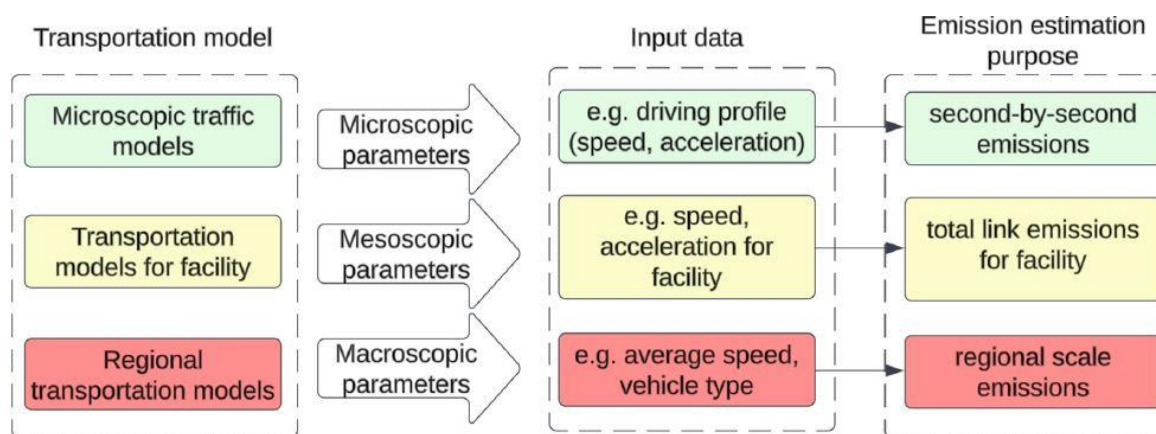
Slika 13. Usporedba različitih konceptata sustava kontrole emisija dizelskih vozila [2].

Glavni zaključci koji su odredili smjernice daljnjeg istraživanja su sljedeći:

1. Sustavi kontrole emisija pružaju visoku učinkovitost samo u određenom rasponu djelovanja, koji je kod klasičnih (nehibridnih) pogonskih sustava gotovo u potpunosti određen zahtjevima korisnika.
2. Veliki broj utjecajnih parametara i međusobna ovisnost sustava za kontrolu emisija čini fizikalne i empirijske modele presloženima kod modeliranja kompletnih vozila.
3. Učinkovitost sustava kontrole emisija nije jednoznačno određena trenutnom radnom točkom MSUI-ja, nego jako ovisi o smjeru i brzini dostizanja radne točke i o povijesti događaja koji opisuju tromost sustava.
4. Korištenje učinkovitijih sustava kontrole emisija povećava utjecaj (polu) hladnih startova na ukupne količine emisija.
5. Sustavi kontrole emisija podložni su kvarovima, osobito u uvjetima rada izvan predviđenih okvira, te mogu utjecati na ispravnost ostalih sustava MSUI-ja, dok će neispravnost kompleksnijih sustava imati veće posljedice na porast količine emisija u stvarnim uvjetima upotrebe.
6. Sustavi kontrole mogu se prilagoditi uvjetima koji vladaju prilikom ispitivanja emisija i potrošnje goriva za vrijeme tipskog odobrenja.

2.2. Modeliranje klasičnih i HEV i strategije upravljanja

Zbog velike složenosti različitih sustava pogona HEV obrađeno je široko područje modeliranja svih njegovih sklopova. Zahtjevi pojedinih modela s obzirom na klasifikaciju HEV-a prema arhitekturi obrađeni su u literaturi [59-68] i stupnju hibridizacije [13, 59, 61, 63, 69]. Razvijeni su različiti pristupi modeliranja cestovnih vozila s različitim razinama detaljizacije. Strogu podjelu modela potrošnje goriva i emisijskih modela vozila nije moguće precizno odrediti jer većina rješenja uključuje različite pristupe i načine upotrebe, klasičnih i hibridnih vozila. Načelna podjela emisijskih modela vozila s obzirom na razmjere upotrebe prema [70] prikazana je na slici 14. Također, prikazani su primjeri primjena i ulaznih podataka potrebnih za procjenu emisija komponenti ispušnih plinova vozila.



Slika 14. Podjela modela s obzirom na razmjere upotrebe [70].

Mikroskopski modeli emisija i potrošnje goriva uzimaju u obzir svako vozilo pojedinačno [71], obrađuju veliku količinu podataka s rezolucijom oko 1s koji se odnose na mjerenja parametara vozila kao što su ubrzanje i brzina, kao i parametara ceste kao što su nagib terena i koordinate položaja. Mikromodeli mogu se klasificirati prema vrsti ulaznih podataka [70]; na temelju profila trenutne brzine [72] (Enviver Versit, Roundabout EM), na temelju parametara vozila kao što je snaga ili specifična snaga (MOVES, CSIRO, CMEM, VT-CPFM) ili na temelju kombinacija prethodno navedenih metoda.

Makroskopski modeli koriste se za procjenu emisija, potrošnje goriva i utjecaja cestovnog prometa na okoliš. Uglavnom formiraju se kao regresijski modeli koji se temelje na parametru prosječne brzine vožnje na analiziranoj dionici ceste (2.1), gdje je:

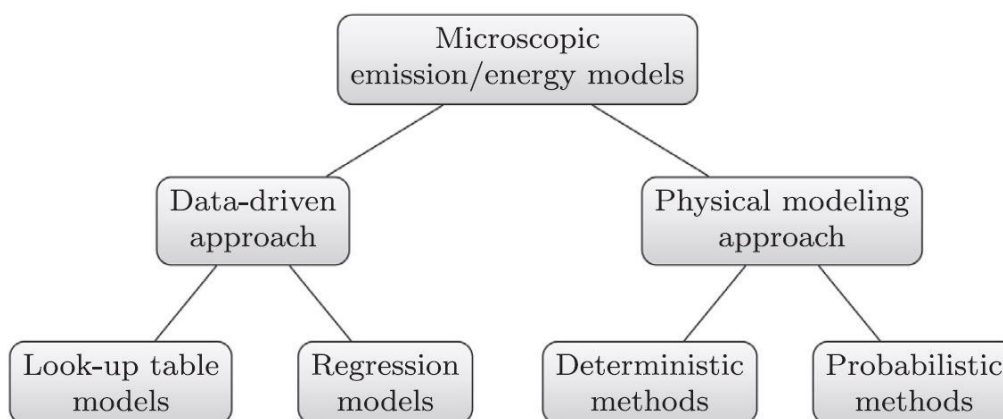
$$F = f(v) = a + b \frac{1}{v} + cv + dv^2 \quad (2.1)$$

Područje ovog rada većinom je ograničeno na mikroemisijske modele pojedinačnih vozila koje možemo općenito zapisati kao funkciju koja povezuje količine pojedinih emisija x s ulaznim varijablama (2.2),

$$J_x = f(u) \quad (2.2)$$

gdje je $x \in (\text{potrošnje goriva ili el. Energije, emisija } CO_2, NO_x, CO, HC \dots)$

Jedna od klasifikacija mikromodela, s obzirom na način formiranja emisijskih modela prema [72], prikazana je na slici 15.

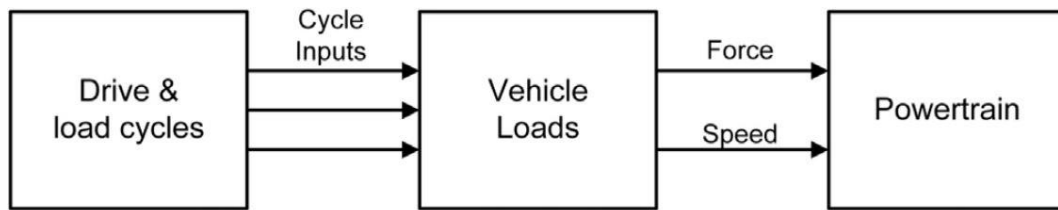


Slika 15. Podjela emisijskih modela i modela potrošnje goriva odnosno energije [72].

Pristup na osnovi mjernih podataka uključuje tablične i regresijske modele. Tablični su modeli zasnovani na emisijskim mapama koje opisuju ponašanje pojedinih emisija i potrošnje goriva u odnosu na promatrane parametre, pri čemu su to najčešće brzina i ubrzanje [73]. Prednost pristupa relativno je jednostavna upotreba zbog ovisnosti o vanjskim varijablama. Osnovni nedostaci vezani su za kreiranje emisijskih mapa na ispitnim stolovima u stacionarnom stanju gdje nisu zastupljeni tranzijentni uvjeti što uzrokuje određene pogreške [74]. Regresijski modeli koriste prikupljene podatke kako bi „obučili“ model da što točnije oponaša te podatke. Ulazni su podaci obično brzina, ubrzanje ili potrebna snaga pogona, a izlazni količine pojedinih emisija odnosno potrošnja goriva. Zbog izrazite nelinearne ovisnosti emisija o ulaznim varijablama ovi modeli često se oslanjaju na neuralne mreže za pronalazak najboljeg rješenja, što uz visoku rezoluciju podataka često predstavlja veliko računalno opterećenje. Modeli su kritizirani zbog uobičajenog korištenja ulaznih podataka s dinamometra umjesto stvarnih uvjeta upotrebe jer su takvi modeli davali značajno niže vrijednosti emisija u odnosu na realne emisije [75, 76]. Navedeni modeli također ne sadrže nikakvu fizikalnu interpretaciju pojava koje opisuju. Suprotno pristupu na osnovi mjernih podataka, fizikalni pristup modeliranju podrazumijeva

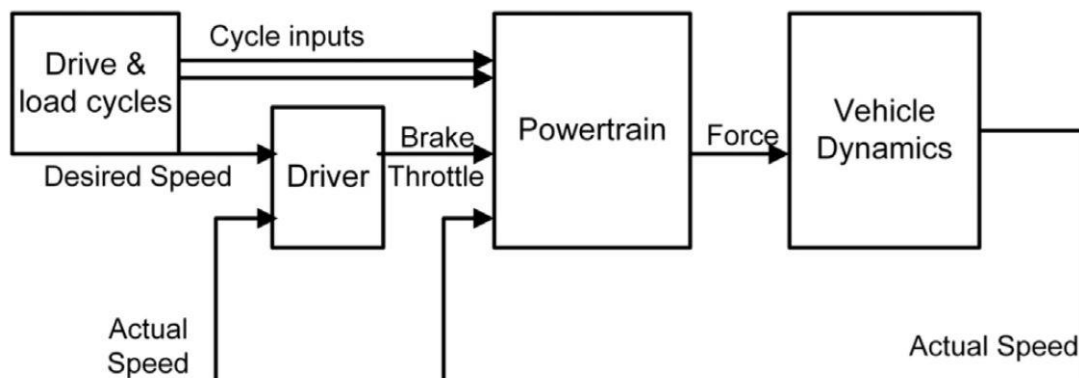
povezivanje parametara i varijabli modela s fizikalnim značenjem. Prema [71] fizikalni modeli mogu biti deterministički i probabilistički. Deterministički fizikalni modeli podrazumijevaju određivanje funkcije količine emisija i potrošnje goriva u ovisnosti o stvarnim varijablama u određenom trenutku. Probabilistički modeli koriste se kada stvarne vrijednosti ulaznih varijabli nisu dostupne. Na primjeru trenutne brzine kao ulazne varijable, umjesto profila brzine koriste se uprosječene brzine na određenim rutama ili područjima uz dodatak slučajnih poremećaja. Autori u [70] uspoređuju modalni model na osnovi matrice trenutne brzine i ubrzanja s fizikalnim modelom gdje je cjelokupan proces nastanka emisija podijeljen na komponente prema fizikalnim pojavama koje ih uzrokuju. Osnovni nedostaci korištenja matrice trenutna brzina-ubrzanje su sljedeći: zanemarivanje nagiba, oslanjanje na statičke rezultate mjerenja, pogreške zbog uprosječenih vrijednosti protoka emisija unutar istog polja matrice te vrlo ograničen broj podataka unutar određenih polja. Najveći je izazov determinističkog fizikalnog modela prikupljanje i obrada velikog broja varijabli kao i definiranje analitike fizikalnih pojava različitih utjecajnih mehanizama. Autori u [17] bave se modeliranjem i upravljanjem HEV-om te predlažu kombiniranu podjelu postojećih modela HEV-a prema načinu upravljanja i prema dinamici na kinematičke unatražne, kvazistatičke unapredne i dinamičke modele.

Kinematički unatražni (*engl. backward*) pristup, prikazan na slici 16., polazi od krajnjih komponenti pogona, tj. od kotača koji zahtijevaju određeni moment odnosno snagu da bi zadovoljili predodređeni ciklus. Protok informacija ide u smjeru suprotnom od toka energije, tj. od pogonskih kotača prema prijenosu i motoru s unutarnjim izgaranjem, odnosno prema električnom stroju i baterijama. Slabosti ovog pristupa proizlaze iz pretpostavke da se kretanje vozila apsolutno poklapa s unaprijed predloženim ciklusom vožnje i uobičajenog korištenja stacionarnih mapa ili tabela učinkovitosti. Pretpostavka o savršenom poklapanju stvarne brzine s unaprijed određenim obrascem ciklusa je osobito nevjerodostojna kada zahtjevi za ubrzanjem i brzinom premašuju performanse vozila. Ovaj pristup obično se kombinira sa statičkim modelima uz zanemarivanje prijelaznih ponašanja, npr. uzrokovanih promjenom temperature MSUI-ja, tj. ne uzima u obzir hladne startove. Pojednostavljeni model prijelaznih pojava kao niza stacionarnih stanja ograničava njegovu upotrebu na preliminarne procjene potrošnje goriva i emisija [17].



Slika 16. Kinematički unatrazni pristup [17].

Kvazistatički unapredni (engl. forward) pristup. Kvazistatički pristup pretpostavlja da su u određenom kratkom vremenskom intervalu sve ulazne varijable konstantne te polazi od zahtjeva korisnika za promjenom brzine na osnovi želje za poštivanjem unaprijed zadanog obrasca brzine i ide u smjeru toka energije [77]. Prethodno navedeni sustav shematski je prikazan na slici 17. Zahtjev korisnika se preko pedale akceleratora i odgovarajućeg regulatora prenosi na MSUI koji ima svoje karakteristike i brzinu odziva. Moment se prenosi na sustav prijenosa koji ima svoje gubitke i prijenosni omjer i tako sve do kotača koji trebaju ostvariti potreban moment. Kvazistatički unapredni pristup je pogodniji za detaljno modeliranje i dinamička opterećenja jer vodi računa o odzivu i tranzijentima određenih sustava vozila [78]. Prikladnost i točnost ovog pristupa uvelike ovisi o tipu provedene simulacije. Kada je u pitanju procjena potrošnje goriva ili količina NO_x emisija, ovakav pristup daje prihvatljive rezultate, dok kod procjene količine čestica i prijelaznih pojava vezanih za odziv turbopunjača radi veće pogreške i zahtijeva detaljniji simulacijski model motora koji bolje opisuje tranzijentno ponašanje [17]. Unatoč navedenim nedostacima, zbog visoke složenosti modela HEV-a i visoke složenosti modeliranja dinamičkog ponašanja motora s unutarnjim izgaranjem, kvazistatički unapredni modeli često se primjenjuju za modeliranje hibridnih vozila [79, 80].



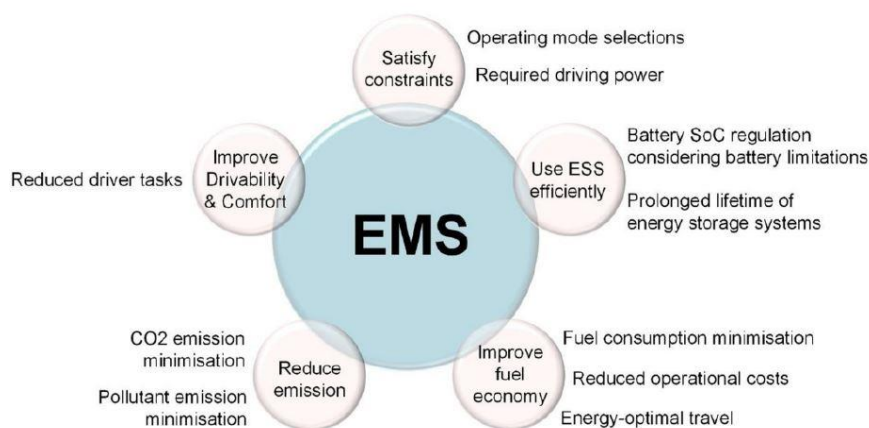
Slika 17. Kvazistatički unapredni model vozila [17].

Dinamički model vozila karakterizira osim opisa prijelaznih pojava uzdužne dinamike vozila i opis prijelaznih pojava motora s unutarnjim izgaranjem koji uključuje i kašnjenje turbopunjača te hladne startove. Sa stajališta upravljanja preferira se tok informacija prema naprijed kao kod unaprednog modela [17, 78]. Razlika u potrošnji goriva između stacionarnog stanja i prijelaznih stanja može biti značajna. Prema istraživanjima autora [81-83], potrošnja goriva tijekom prijelaznih stanja je između 6 i 30 % u izrazito dinamičkim uvjetima veća od stacionarne. Metode za predviđanje prijelaznih pojava dijele se na metode koje su temeljene na korekcijama ustaljenog stanja te na metode temeljene na izravnom predviđanju upotrebom dinamičkih varijabli. Autori [81, 82, 84] koriste metode temeljene na korekcijama ustaljenog stanja uz korekcijske faktore masenog protoka zraka, brzine vrtnje motora i temperature. Istraživanja [84] pokazuju da ovakav dinamički model u izrazito promjenjivim uvjetima brzine vrtnje i opterećenja motora smanjuje grešku predviđanja potrošnje goriva s 20 % za statički model na manje od 2 %. Autori u [83] navode kao osnovni nedostatak ovog pristupa složen način mjerenja korekcijskih faktora, osobito masenog protoka što mu ograničava širu primjenu. Autori u [85] koriste model vozila temeljen na izravnom predviđanju upotrebom dinamičkih varijabli i njihovih proteklih vrijednosti u fiksno definiranom periodu. U istom radu kao ulazi modela koriste se lako mjerljivi podaci brzina i ubrzanje. Unatoč dobrim rezultatima u pojedinim aplikacijama nedostatak ovakvog modela je taj što ne uzima u obzir uzdužni nagib ceste odnosno promjenu visine, a što mu ograničava upotrebu na ceste bez velikih visinskih promjena. Kod modeliranja hibridnih vozila ne postoji mogućnost razlikovanja više izvora energije, a što je također bitno ograničenje modela. U radu [83] izrađen je model koji kombinira prednosti prethodno navedenih tranzijentnih modela, koristi metodu korekcije ustaljenog stanja, koja uzima u obzir uzdužni nagib ceste, dok su korekcijski faktori brzina i ubrzanje lako mjerljivi elementi modela. Pogreška modela [32] smanjuje se na polovicu tijekom tranzijentnih opterećenja u odnosu na statički model i 2.7 % do 4.6 % u odnosu na model temeljen na dinamičkim varijablama brzine i ubrzanja razvijen u [72]. Točniji opis ponašanja emisija i potrošnje goriva dobiva se višedimenzionalnim ili detaljnim jednodimenzionalnim numeričkim modelima dinamike fluida, korištenim u [1]. Navedeni modeli omogućavaju da se izrazito dinamični događaji, kao što su nagle promjene momenta i brzine vrtnje, pouzdano simuliraju s velikom točnošću. Veliki je nedostatak ovakvog pristupa dinamičkog modeliranja složenost modela koja zahtijeva velike ljudske i računalne resurse te vrijeme za obradu podataka. Primjena

ovakvog tipa modeliranja najčešće je ograničena na specifična područja istraživanja koja se bave razvojem motora s unutarnjim izgaranjem [1, 86].

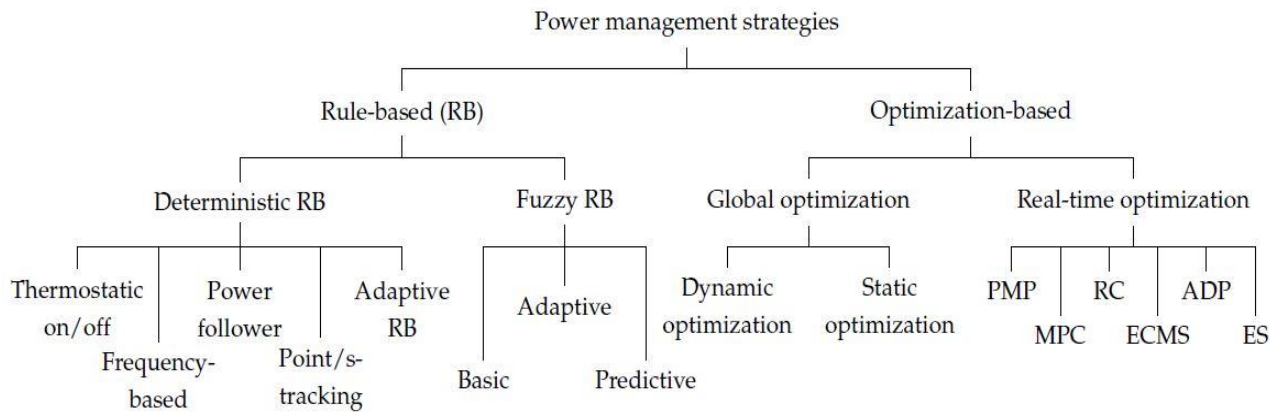
Snažan razvoj računala omogućio je razvoj računalnih metoda i napredak u razvoju simulacijskih softvera za različite komponente i topologije vozila. Dio programskih paketa oslanja se na modalnu analizu odnosno na grupiranje podataka prema vanjskim varijablama, kao primjerice snaga na kotačima, brzina i/ili ubrzanje. Primjeri paketa koji koriste modalnu analizu su CMEM (Comprehensive Modal Emission Model) [87], VERSIT i MOVES koji koristi VSP analizu [88]. Drugi je pristup oslanjanje na unutarnje varijable i opis osnovnim fizikalnim veličinama, kao što su sila, moment, brzina, kutna brzina, ubrzanje, kutno ubrzanje, masa i moment inercije, gdje se svaka komponenta prikazuje analitički. Ovakav pristup najjednostavnije je implementirati unutar računalnih simulacija. Virtual Test Bed (VTB), Power electronics simulator (PSIM), Simplorer, i V-ELph su primjeri programskih alata koji se oslanjaju na fizikalne modele [89]. Dio simulacijskih modela hibridnih vozila se za nelinearne komponente koje su neprikladne za matematički opis oslanja na mape i krivulje koje opisuju različite veličine u ovisnosti o jednom ili više parametara [78, 89-93]. Jedan od češće korištenih je ADVISOR [78, 89, 90, 94, 95], koji je razvio Američki nacionalni institut za obnovljive izvore NREL u MATLAB/SMULINK okruženju. Specifičan je po tome što koristi mješoviti unapredni i unatražni pristup, dok su pojedine komponente vozila izrađene kao kvazistatički modeli, što ga ograničava na veće vremenske intervale. Nadalje, oslanja se na unutarnje varijable i eksperimentalne modele u obliku tablica i mapa učinkovitosti [89]. Powertrain System Analysis Toolkit PSAT razvijen je u Matlab / Simulink okruženju i koristi unapredni pristup modeliranju [80] dok Hybrid Powertrain Simulation Program HPSP koristi unatražni pristup [91]. CruiseM je softverski paket s grafičkim sučeljem koji je razvila tvrtka AVL i koji se može konfigurirati da koristi unapredni i unatražni pristup kao i njihove kombinacije ovisno o zahtjevima simulacije [4, 92, 96]. Za dinamičke modele MSUI-ja AVL je razvio poseban programski paket BOOST koji koristi kvazidimenzionalne, odnosno jednodimenzionalne modele za opis procesa unutar cilindra, i opise usisa i ispuha [97], te FIRE koji se oslanja na višedimenzionalne modele računalne dinamike fluida. Odabir pogodnog programskog paketa i metode ovisi o zahtjevima za brzinom i točnosti, koji ovise o izboru modela. Primjerice numerički modeli motora zasnovani na CFD-u daju najbolje rezultate u smislu točnosti i dinamike vremenski i prostorno ovisnih pojava, međutim zbog složenosti modela i vremena trajanja analize navedeni je pristup apsolutno neprihvatljiv kod modeliranja kompletnog pogonskog sklopa ili cijelog vozila.

Kroz kvalifikacijski ispit [98] obrađene su najčešće korištene **strategije upravljanja energijom** HEV-a čiji ishod ovisi o kvaliteti modela na koji su primijenjene. Polazna točka pronalaska optimalnog rješenja je definiranje funkcije cilja koja ovisi o specifičnostima primjene. U najvećem broju slučajeva strategija upravljanja energijom svodi se na kompromis između minimalizacije potrošnje goriva, odnosno emisija ispušnih plinova [63], povećanje trajnosti komponenti poput baterija, ispunjavanje zahtjeva za snagom, osiguravanje voznih karakteristika i komfora [64], slika 18.



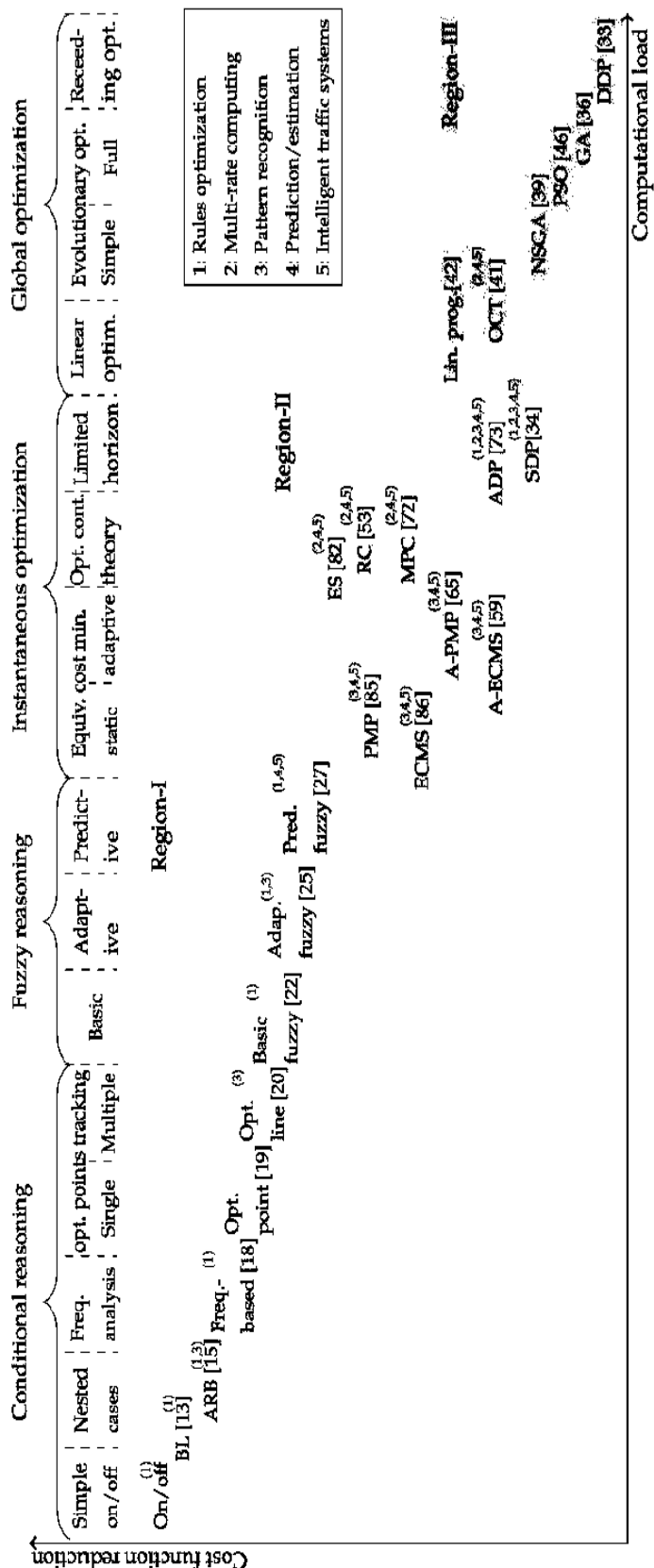
Slika 18. Osnovni zahtjevi EMS HEV-a [99].

Velik broj familija strategija upravljanja energijom EMS (*engl. Energy Management Strategy*), neki autori koriste izraz PMS (*engl. Power Management Strategy*), obrađen je u literaturi i nije jednostavno napraviti jednoznačnu klasifikaciju zbog isprepletanja različitih pristupa unutar jedne fleksibilne strategije. Kao osnovnu podjelu [62, 100] navode offline EMS koje su pogodne za globalnu optimizaciju, a temelje se na unaprijed poznatom ciklusu vožnje i online EMS za određivanje trenutno optimalnog rješenja u realnom vremenu. Autori [63, 99, 101-103] dijele familije EMS-a na one temeljene na pravilima (*engl. Role Based*) unutar kojih se sustav pogona ponaša, i one temeljene na optimizaciji (*engl. Optimization Based*) parametara sa svrhom određivanja najboljeg rješenja, primjer takve klasifikacije je prikazan na slici 19.



Slika 19. Klasifikacija EMS [103].

Strategije u realnom vremenu ili online strategije primjenjuju trenutna pravila upravljanja energijom temeljena na budućim pretpostavkama kako bi minimizirali ukupnu funkciju troška. Globalne ili offline metode zbog svoje prirode tj. poznavanja ciklusa unaprijed i složenosti nisu primjenjive u realnom vremenu, ali s druge strane predstavljaju referentna rješenja koja se mogu koristiti kao mjerila uspješnosti i dobar alat za analizu te procjenu učinkovitosti online metoda. U pravilu je cilj postići što bolji rezultat sa što manje upotrijebljenih ljudskih i računalnih resursa u što kraćem vremenu. Pregled različitih metoda, s obzirom na računalno opterećenje i optimalnost rješenja, prikazan je na slici 20., gdje se vidi da postizanje boljeg rješenja traži veće računalno opterećenje odnosno vrijeme pronalaska optimalne strategije upravljanja energijom.



Slika 20. Usporedba različitih strategija upravljanja energijom [103].

2.3. Modalna analiza pomoću specifične snage

Jimenez [104] je prvi predložio metodu koja definira specifične emisije i potrošnju goriva prema parametru specifične snage vozila, tj. analizu prema specifičnoj snazi (*engl. Vehicle Specific Power, VSP*), iako je autor u [105] ranije doveo u vezu emisije i potrošnju goriva s pozitivnom kinetičkom energijom što je na tragu VSP definicije. Specifična snaga vozila definirana je kao trenutna snaga po jedinici mase vozila. Trenutna snaga koju generira motor s unutarnjim izgaranjem troši se na svladavanje aerodinamičkog otpora i otpora kotrljanja te na povećanje kinetičke i potencijalne energije vozila (2.3).

$$\begin{aligned}
 VSP &= \frac{\frac{d}{dt}(KE + PE) + F_{roll} \cdot v + F_{aero} \cdot v}{m} \\
 &= \frac{\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}m \cdot (1 + \varepsilon_i) \cdot v^2 + mgh\right) + C_R \cdot mg \cdot v + \frac{1}{2}\rho_a C_D A (v + v_w)^2 \cdot v}{m} \quad (2.3) \\
 &= v \cdot (a \cdot (1 + \varepsilon_i) + g \cdot grade + g \cdot C_R) + \frac{1}{2}\rho_a \frac{C_D A}{m} (v + v_w)^2 \cdot v
 \end{aligned}$$

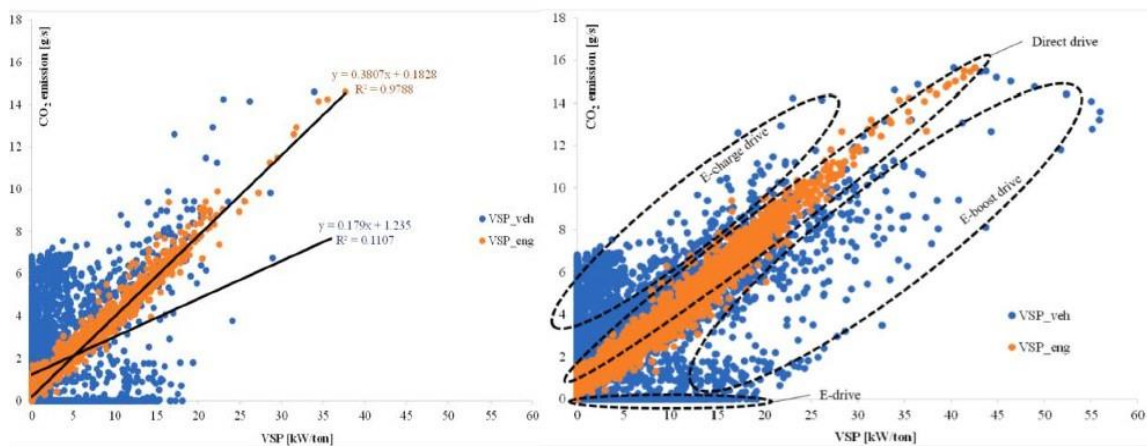
Koristeći tipične parametre temeljene na prosječnim vrijednostima koeficijenta otpora zraka i koeficijenta otpora kotrljanja za putničko vozilo srednje klase i gustoću zraka pri 20 °C, izraz (2.4) prelazi u [104]:

$$\begin{aligned}
 VSP &= v \cdot (a \cdot 1.1 + 9,81 \cdot grade + 0,0135) + \frac{1}{2} \cdot 1,207 \cdot 0.0005 \cdot (v + v_w)^2 \cdot v \\
 &= v \cdot (a \cdot 1.1 + 9,81 \cdot grade\% + 0,0132) + 3.2 \cdot 10^{-4} \cdot (v + v_w)^2 \cdot v \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

U VSP analizi uglavnom se koriste rasporedi modalnih razreda s konstantnim rasponima jednake širine. Dio pogreške modalnih emisija čini usrednjavanje unutar razreda jer su iste definirane kao maseni protoci u jedinici vremena koji u energetski zastupljenijim razredima, u pravilu, rastu sa snagom. Osim specifične snage korišteni su drugi parametri kao brzina, ubrzanje i nagib ceste [70, 105, 106], koji su direktno mjerljivi, ali sa slabijom korelacijom prema emisijama i potrošnji goriva. Mnogi modeli koji nisu primarno nastali na VSP analizi koriste VSP parametar zbog jake korelacije VSP-a s emisijama i potrošnjom goriva [107].

Također koriste se u modelima koji zahtijevaju nešto veće točnosti kao usporedbe emisija između različitih goriva, E85 i benzina kod osobnih putničkih vozila [108]. Autori u [109] koriste VSP modele za procjene emisija i potrošnje goriva autobusa pogonjenih gorivnim člancima i dizelskim motorima. Autor u [110] koristi VSP analizu u svrhu poboljšanja predviđanja modalnih modela s parametrom brzine na način da radi procjenu utjecaja promjene opterećenja brojem putnika gradskih autobusa na modalne emisije i potrošnju goriva prema parametru brzine. Osnovni razlog provedene korekcije je neosjetljivost originalnog modela na promjenu opterećenja. Autori u [111] ispituju u realnim uvjetima 10 različitih automobila i dovode u korelaciju potrošnju goriva prema VSP parametru. U istom je utvrđeno kako je za vozila pokretana motorima s elektroničkim ubrizgavanjem korelacija između potrošnje goriva i specifične snage linearna, dok je kod starijih vozila, koja koriste rasplinjače, eksponencijalna funkcija. Odstupanja modela u odnosu na izmjerene podatke samo su kod jednog vozila bila veća od 16 %. Autor u literaturi [83] u razvoju dinamičkog modela potrošnje goriva temeljenog na korekciji ustaljenog stanja koristi VSP parametar u razvoju tranzijentnog modula kao i za filtriranje mjernih podataka u svrhu odbacivanja ekstrema mjernih rezultata svakog raspona koji su u normalnoj raspodjeli izvan 3σ , prema [112]. Unatoč velikom uzorku podataka na osnovi kojih [112] razvija tranzijentni VSP model, kao i korištenju 3σ filtera, ipak uzrokuje veliku relativnu pogrešku procjene veću od 30 %. Razlog visoke pogreške leži u korištenju univerzalnog modela za više vozila, ali i u jednostavnom prikupljanju podataka s OBD modula umjesto instalacije daleko točnijeg PEMS uređaja. Autor u literaturi [113] analizira upravljanje pogonom i energijom na PHEV vozilu, dovodi u korelaciju promjenu stupnja napunjenosti (*engl. State of Charge, SoC*) odnosno snagu baterije s VSP parametrom, posebno za uključen MSUI, a posebno za isključen. VSP analizu koristi za procjenu preostalog SoC-a u CS i CD modu, ne bavi se analizom emisija. Funkcija SoC iz modela vrlo dobro aproksimira izmjerene podatke s koeficijentom R^2 oko 0,99. Autor u literaturi [114] izrađuje VSP model s 14 raspona snage FHEV vozila tako što mjeri emisije i potrošnju goriva pomoću PEMS uređaja, a zatim vrši validaciju modela prema NEDC ciklusu u kojem je vozilo tipski odobreno. Nedostatak oslanjanja na podatke NEDC ciklusa je problem ispitivanja na „Golden Vehicle“ vozilu što sigurno utječe na točnost modela. Koristi pojednostavljenu univerzalnu definiciju VSP-a prema [104] što pojednostavljuje model, ali i smanjuje točnost. Odstupanje modela od certificiranih podataka prema NEDC protokolu je u potrošnji goriva -3,2 %, CO emisija +18,1 % i NO_x emisija 26,2 %. Navedeno odstupanje CO₂ emisija nije u skladu s potrošnjom goriva. Najbitniji razlog slabog funkcioniranja klasičnih VSP modela kod hibridnih vozila, za razliku od klasičnih, slaba je korelacija VSP parametra s emisijama i potrošnjom goriva. Razlog je

postojanje dva izvora energije od kojih je samo jedan odgovoran za emisije i potrošnju goriva, dok strategija upravljanja energijom određuje njihove odnose. Samo je nekoliko autora različitim korekcijama pokušalo povezati emisije i potrošnju goriva hibridnih vozila s VSP parametrom. Wang je u [115] detektirao problem korištenja klasične definicije VSP analize kod HEV-a s visokim stupnjem hibridizacije u vidu vrlo slabe korelacije potrošnje goriva, odnosno CO₂ emisija a VSP parametrom vozila. Na osnovi analiziranih podataka uvidio je potrebu uključivanja unutarnjih varijabli unutar VSP modela. U istom radu autor predlaže uvođenje VSP parametra u odnosu na snagu motora, umjesto u odnosu na pogonsku snagu vozila, čime povećava koeficijent korelacije s $R^2=0.11$ na $R^2=0.98$ u uvjetima gradske vožnje, slika 21.



Slika 21. Usporedba korelacije CO₂ emisija s VSP parametrom vozila i VSP parametrom motora [115].

Duarte i ost. u [116] koriste VSP metodu za određivanje korelacije između potrošnje goriva i specifične snage vozila za više kategorija vozila, ukupno 20, pogonjenih dizelskim, benzinskim ili hibridnim pogonom. Specifičnost je pristupa u pronalaženju funkcija modela koje u zavisnosti o VSP parametru najbolje opisuju potrošnju goriva različitih vozila, te naknadna korekcija modela posebno klasičnih, a posebno hibridnih vozila linearnom funkcijom. Cjelokupno područje rada podijeljeno je na tri zasebna dijela koji su opisani konstantom za $VSP < -10$, kvadratnom aproksimacijom za $-10 < VSP < 10$ i linearnom za $VSP > 10$. Dok se klasična vozila ponašaju prilično ujednačeno i zahtijevaju manji upliv linearne korekcije, modeli hibridnih vozila značajno odstupaju ovisno o primijenjenoj konfiguraciji; upliv linearne korekcije je čak suprotan za različita vozila. Razlozi osjetljivosti hibridnih modela na konfiguraciju leže u različitim postavkama strategije upravljanja energijom i različitim primijenjenim tehnologijama MSUI-ja. Iz istog razloga modeli istog proizvođača

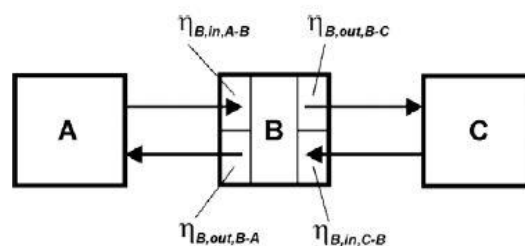
pokazuju ista obilježja. Odstupanja potrošnje goriva korigiranih modela HEV-a su između -3.6 % i 6.8 %. Pristup pokazuje da je moguće izraditi upotrebljiv VSP model potrošnje goriva hibridnog vozila koji dobro replicira postojeće stanje upotrebom linearnih korekcijskih faktora bez utjecaja na strategiju upravljanja odnosno na same uzroke odstupanja, zbog čega vozila s drugačijim strategijama zahtijevaju potpuno različite korekcije osnovnog modela. Mera i ost. [117] grade vrlo složen korekcijski VSP model benzinskih hibridnih vozila s motorima s direktnim i indirektnim ubrizgavanjem i dizelskih hibridnih vozila sa samo EGR kontrolom NO_x emisija i kombinacijom EGR-SCR sustava. Odabrana su vozila s različitim tehnologijama motora s unutarnjim izgaranjem zbog izrazito različitih ponašanja ukupnih NO_x emisija [2]. Svaki VSP raspon dijeli se na $m \times m$ područja opterećenja i brzine vrtnje za koje se definiraju mape pojedinih emisija. Faktor korekcije definiran je kao odnos emisija koje proizlaze iz mapa motora i emisija pripadajućeg VSP raspona. Drugi parametar je τ koji definira najmanji broj podataka u svakoj od jediničnih m podjela. Parametri m i τ optimiraju se za svaki pojedini model zasebno odnosno prema grupama, posebno za benzinska, posebno za dizelska vozila. U pogledu CO₂ emisija najveći dobitak ovakvog pristupa je vidljiv tamo gdje standardni VSP model generira najveću pogrešku, tj. kod vozila pogonjenog benzinskim motorom s direktnim ubrizgavanjem u gradskim uvjetima vožnje gdje je primjerice greška modela smanjena s 27,9 % na 10,3 %, dok je pogreška tipskog modela 2,1 % veća u odnosu na individualni. Kod NO_x modela svih testiranih vozila ostvareno je povećanje točnosti, ali je pogreška i dalje znatno veća u odnosu na CO₂ emisije i potrošnju goriva. Prednosti su modela značajno povećanje točnosti kod CO₂ emisija osobito gdje standardni VSP generira najveću grešku i relativno malo odstupanje tipskog modela od individualnog. Povećanje točnosti NO_x modela nije toliko značajno, međutim nedostatak je i vrlo složen postupak dobivanja modela višeparametarskom optimizacijom i Paretovom analizom. Zhai i ost. [118] izrađuju model emisija i potrošnje goriva FHEV-a na osnovi modalne VSP analize, uvode osnovnu logiku upravljanja energijom koja uključuje samo vrijeme rada motora s unutarnjim izgaranjem prema kriteriju produkta brzine i ubrzanja. Prednost je ovakvog pristupa mogućnost uvođenja dodatnih parametara nagiba ceste i SoC u logike pokretanja i zaustavljanja motora s unutarnjim izgaranjem, što u radu nije primijenjeno jer je testiranje provedeno isključivo na valjcima, a SoC je zanemaren. Osnovni je nedostatak modela nemogućnost utjecaja na odnose između pojedinih izvora energije za vrijeme rada MSUI-ja. Nadalje, procjena regenerirane energije nije objašnjena u radu zbog čega primjena bilo kakve strategije upravljanja energijom, osim kopiranja postojećeg ponašanja, nije moguća. Jedan od uzroka pojedinačnih odstupanja leži u činjenici da su modalne emisije definirane kao maseni protoci u jedinici vremena čime se u odnosu na definiciju količine

pojedinih emisija po jedinici vučne energije otvara mogućnost dodatne pogreške. Također ovakva definicija modalnih emisija preko uprosječenog protoka dodatno komplicira zapis funkcije cilja kao polazne točke određivanja strategije upravljanja.

2.4. Dijagram toka energije HEV-a

Poznavanje tokova energije i energetska analiza ključni su elementi za razumijevanje dobitaka sustava hibridnog pogona, u smislu povećanja ukupne učinkovitosti i smanjenja emisija ispušnih plinova. Ako promatramo vozilo s konvencionalnim pogonom, motor s unutarnjim izgaranjem pretvara kemijsku energiju goriva u mehaničku energiju. Mehanička energija najvećim se dijelom koristi za pokretanje vozila i manjim dijelom za pogon pomoćnih sustava. Kod hibridnih pogona je situacija bitno drugačija, zahtjev za snagom je zbroj snage koja dolazi iz kemijske energije tj. motora s unutarnjim izgaranjem i snage koja dolazi iz baterije, odnosno snage električnog stroja koja može imati i pozitivan i negativan predznak.

Energetski tokovi u literaturi [119] uglavnom se opisuju kao skup fizikalnih i empirijskih modela pojedinačnih komponenti od kojih se vozilo sastoji. Navedeni koncept koristan je kod klasičnog fizikalnog pristupa modeliranju vozila zbog detaljnog opisa, dok je za modalne modele preopsežan. Detaljan i opširan energetska analitički samostojeći (*engl. stand alone*) koncept razvio je Ktrašnik [120] gdje on definira tokove energije za gotovo sve poznate topologije hibridnih pogona; serijsku, paralelnu, serijsko-paralelnu i kompleksnu. Na osnovi dijagrama toka energije izvodi jednadžbe temeljene na energetske bilanci, koje daju detaljan opis svih energetske tokova i gubitaka svih elemenata sustava. Tokovi su energije dvosmjerni s tim da su za svaki element definirani gubici odnosno učinkovitosti za ulaz i izlaz energije prema svakom susjednom elementu, slika 22.



Slika 22. Podjela gubitaka elementa B kod dvosmjernog toka energije [120].

Analiza emisija i potrošnje goriva obično se predviđa za određeni ispitni ciklus vožnje, zbog toga je cjelokupna energija koja prolazi kroz pojedine elemente sustava sumirana vrijednost za cijeli ciklus (2.5).

$$W_{A-B} = \int_0^{t_{tc}} P(t)_{A-B}^* dt \quad (2.5)$$

Definirani tokovi energije za oba smjera, smjer A-B je definiran prema (2.6):

$$P(t)_{A-B}^* = \begin{cases} P(t)_{A-B}, & P(t)_{A-B} \geq 0 \\ 0, & P(t)_{A-B} < 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Posebno je definiran tok energije u suprotnom smjeru B-A (2.7):

$$P(t)_{B-A}^* = \begin{cases} -P(t)_{A-B}, & P(t)_{A-B} < 0 \\ 0, & P(t)_{A-B} \geq 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Pretpostavlja se pozitivni tok kad energija ulazi u element, a negativni kad iz njega izlazi, razlika ulaznog i izlaznog toka su gubici elementa W_B (2.8):

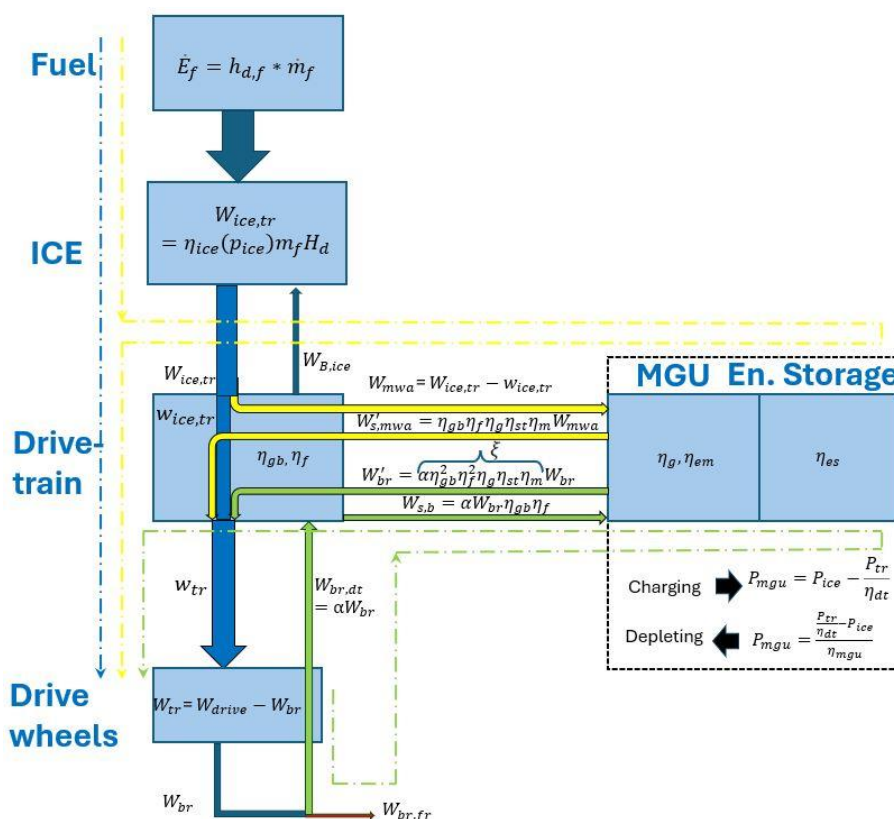
$$W_B = \sum_{i=1}^{n_{inflow}} W_{i-B} - \sum_{j=1}^{n_{outflow}} W_{B-j} \quad (2.8)$$

Kad se uvrste faktori gubitaka na ulaznoj i izlaznoj strani elementa, izraz prelazi u (2.9):

$$0 = \sum_{i=1}^{n_{inflow}} \eta_{B,in,i-B} W_{i-B} - \sum_{j=1}^{n_{outflow}} \frac{1}{\eta_{B,out,i-B}} W_{B-j} \quad (2.9)$$

Prednost Ktrašnikove definicije toka energije je primjenjivost na sve topologije, stupnjeve hibridizacije i na sve elemente koji se nalaze u sustavu. Osnovni je nedostatak ogroman broj varijabli koji za posljedicu ima visoku složenost modela. Zbog navedenog razvijen je vlastiti dijagram toka energije orijentiran i prema funkciji [121], slika 23. Plava isprekidana linija predstavlja tok energije vozila s klasičnim pogonom, kemijska energija goriva se u MSUI-ju pretvara u mehanički rad s koeficijentom iskorištenja koji jako ovisi o položaju radne točke. Dalje mehanička energija prolazi kroz sustav pogona do pogonskih kotača s gubicima mjenjača i završnog prijenosa. Tok energije regenerativnog kočenja označen je zelenom linijom, energija kočenja se uzima s kotača i pretvara u povoljan oblik za spremanje, te se ponovno vraća istim putem do pogonskih kotača. Gubici energije su definirani na sljedećim elementima: završni prijenos, mjenjač, električni stroj u generatorskom režimu, baterija, električni stroj u motornom režimu, mjenjač i završni prijenos uz koeficijent ograničenja α . Treći tok opisuje spremanje

viška mehaničke energije iz MSUI-ja u spremnik i vraćanje energije na pogonske kotače, isti je označen žutom isprekidanom linijom. Gubici energije su definirani na sljedećim elementima: električni stroj u generatorskom režimu, baterija, električni stroj u motornom režimu, mjenjač i završni prijenos. Ovaj tok energije omogućava pomak radne točke odnosno trenutnog radnog područja MSUI-ja prema energetski ili emisijski povoljnijem radnom području. Navedena definicija toka energije prema funkciji uvelike pojednostavljuje zapis funkcije cilja, a time i definiranje strategije upravljanja uz minimalan broj unutarnjih varijabli.

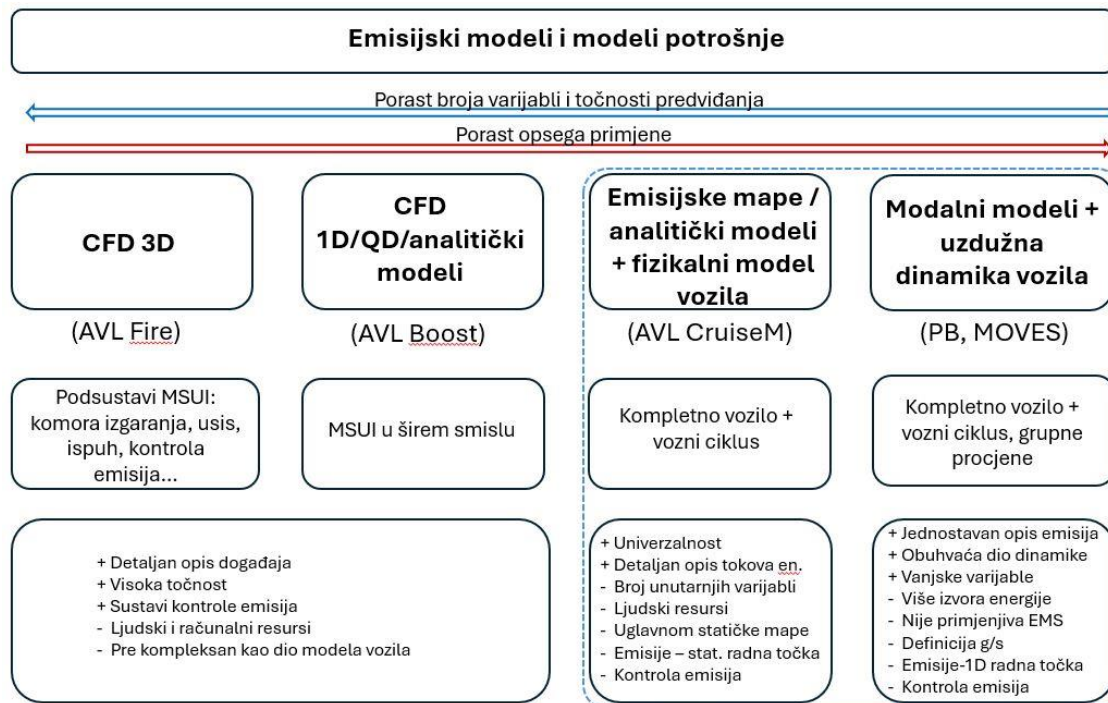


Slika 23. Dijagram toka energije paralelnog HEV-a prema [121].

2.5. Sažetak postojećeg stanja i smjernice daljnjeg istraživanja

Specifičnosti emisijskih modela su posljedica složenih procesa nastajanja emisija unutar komore izgaranja i složenih procesa u sustavima za kontrolu emisija. Njihov opis ovisi o varijablama koji su mjerljive isključivo unutar samog sustava, a na vrlo kompleksan način su povezani s radnim parametrima motora s unutarnjim izgaranjem i što je detaljno obrađeno na

početku ovog poglavlja i kroz pregledni rad [2]. Pregled osnovnih karakteristika različitih emisijskih modela i modela potrošnje goriva prikazan je na slici 24.

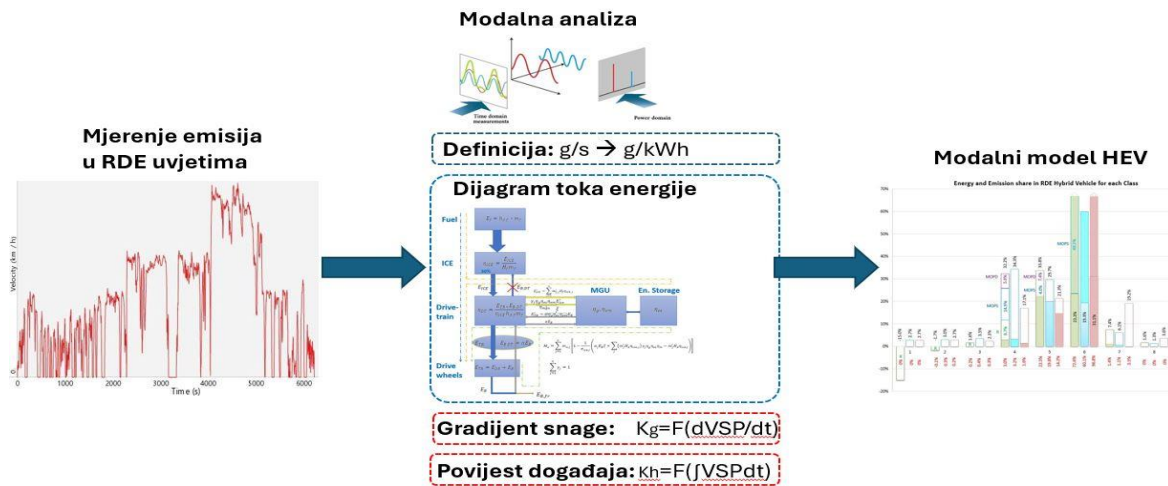


Slika 24. Pregled različitih emisijskih modela i modela potrošnje goriva.

Numerički, jedno ili višedimenzionalni emisijski modeli i modeli potrošnje goriva (modeli izgaranja), kao i složeni empirijski modeli koji se oslanjaju na velike brojeve unutarnjih varijabli, koriste se u specifičnim područjima istraživanja kao što je razvoj MSUI-ja, kao primjerice u radu [1], ali nisu prihvatljivi u modeliranju potpunih vozila. Kombinacija fizikalnih modela uzdužne dinamike vozila i energetskih tokova pogonskih sustava vozila sa stacionarnim emisijskim mapama, i mapama potrošnje goriva, predstavljaju uobičajen način modeliranja klasičnih i hibridnih vozila. Takvi su modeli nezamjenjivi u području razvoja pojedinačnih sustava zbog fizikalnog opisa svih ključnih komponenti. Osnovni su nedostaci zanemarivanje tranzijentnih utjecaja na količine emisija i potrošnju goriva koje je vrlo teško povezati s vanjskim varijablama kao i za ogroman broj varijabli, osobito kad su u pitanju hibridna vozila. Predviđanje emisija vezano je isključivo za trenutnu radnu točku motora, dok su smjer dostizanja radne točke, kao i povijest događaja, najčešće zanemareni unatoč značajnom utjecaju osobito na sustave za kontrolu emisija [2]. Zbog izrazitih prednosti u vidu ovisnosti većinom o vanjskim lako dostupnim varijablama i značajno jednostavnijem zapisu, modalni

modeli prikladni su u procjenama emisija i potrošnje goriva vozila, osobito u stvarnim uvjetima upotrebe i u grupnim procjenama. Modalni modeli na osnovi pogonske snage ili specifične pogonske snage VSP-a pokazuju značajno bolju korelaciju s parametrima MSUI-ja u odnosu na ostale skupine modalnih modela, a time i s emisijama i potrošnjom goriva samih vozila. Jedan od uzroka pojedinačnih odstupanja leži u činjenici da je klasična VSP definicija modalnih emisija definirana kao maseni protok u jedinici vremena [104]. Na ovaj se način u odnosu na definiciju količine pojedinih emisija po jedinici vučne energije otvara mogućnost dodatne pogreške unutar svakog modalnog razreda, ovisno o njegovoj širini. Primjena modalnih modela na hibridna vozila slabo je zastupljena u literaturi zbog slabije korelacije klasične definicije VSP parametra s emisijama i potrošnjom goriva, iz razloga postojanja dva izvora energije od kojih je samo jedan odgovoran za emisije i potrošnju goriva [115], dok strategija upravljanja energijom regulira njihove odnose. Najčešće se koriste samo djelomični modeli HEV-a temeljeni na VSP analizi za procjenu grupne potrošnje goriva i emisija HEV-a u različitim uvjetima vožnje. Ovi modeli ne primjenjuju tokove energije koji su neophodni u izradi strategije upravljanja i njezinoj optimizaciji, odnosno procjenu maksimalne učinkovitosti hibridizacije. Autori modalnih modela hibridnih vozila obrađenih u literaturi [116-118] uglavnom korigiraju klasični VSP model regresijskim faktorima u svrhu poboljšanja predviđanja emisija i potrošnje goriva, ali bez značajne uzročno-posljedične interpretacije koja bi dovela do zaključaka o uzrocima odstupanja. Unatoč korekcijama, točnosti predviđanja emisija i potrošnje goriva znatno su lošiji u usporedbi s modalnim modelima klasičnih vozila.

S obzirom na postojeće znanstvene spoznaje, prethodno obrađene u ovom poglavlju, može se zaključiti da područje modalnih modela nije dovoljno istraženo i da postoji značajan prostor za poboljšanje u području modeliranja hibridnih vozila. Potrebno je predložiti novi model emisija i potrošnje goriva hibridnog vozila temeljen na potpuno drugačijem pristupu koji će zadržati prednosti sadašnjih modalnih modela u vidu broja varijabli, uz uključivanje specifičnosti i rješavanje nedostataka postojećih modela hibridnih vozila, nedostatka VSP modela i problema tranzijentnog ponašanja. Shematski prikaz nastanka modela prikazan je na slici 25.



Slika 25. Planirani elementi emisijskog modela HEV-a.

Osnovni preduvjet kvalitetnog predviđanja emisija i potrošnje goriva hibridnog vozila podrazumijeva mogućnost primjene strategija upravljanja energijom na najvišoj razini koje omogućavaju razlikovanje više od jednog izvora energije. Strategija upravljanja definira se u odnosu na tokove energije čije univerzalne definicije, orijentirane prema elementu [120], oslanjaju se na relativno velik broj unutarnjih varijabli koje treba svesti na najmanju moguću mjeru uz zadržavanje točnosti na zadovoljavajućoj razini. To je moguće postići korištenjem predloženog toka energije, hibridnog vozila, orijentiranog prema funkciji [121]. Definicija modalnih emisija po jedinici pogonske energije povećava točnost predviđanja unutar modalnog razreda u odnosu na klasičnu definiciju masenog protoka. Korištenje ulaznih podataka iz stvarnih uvjeta upotrebe umjesto podataka iz stacionarnih uvjeta uključuje dio tranzijentnog ponašanja emisijskog modela. Za kvalitetnije predviđanje emisija kod izraženijih tranzijenata i hladnih startova nije dovoljno definiranje emisija u trenutnoj radnoj točki koja uključuje uprosječenu dinamiku. Naime, potrebno je uključiti utjecaj gradijenta snage kao i povijest događaja koji su većinom povezani sa sustavima kontrole emisija [2].

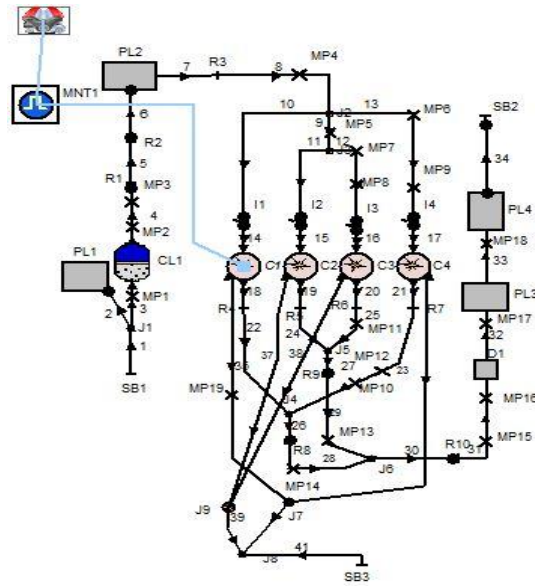
3. PROVEDENO EKSPERIMENTALNO I NUMERIČKO ISTRAŽIVANJE I RAZVOJ EMISIJSKOG MODELA

3.1. Primjena numeričkog 1D/QD modela motora u ispitivanju koncepta povećanja učinkovitosti izmjene radne tvari kod benzinskog motora pri djelomičnom opterećenju

Pregledom literature, nadolazeći emisijski propisi [10, 122], raskorak u odnosu na emisije u stvarnim uvjetima upotrebe [75, 123, 124] i dugoročni planovi o ograničenjima CO₂ emisija [7] detektirani su kao najveći izazovi, a možda i ključni problemi opstanka vozila pokretanih motorima s unutarnjim izgaranjem. Prijedlozi rješenja dijelom leže u boljim predviđanjima emisija i potrošnje goriva kroz kvalitetnije modele kao i u povećanju učinkovitosti ključnih komponenti pogona. Prvi je korak eksperimentalnog istraživanja primjena numeričkog modela u ispitivanju koncepta povećanja ukupne učinkovitosti benzinskog MSUI-ja kroz povećanje učinkovitosti izmjene radne tvari.

Glavni je cilj rada [1] potvrditi hipotezu da je moguće značajno povećati ukupnu učinkovitost pri niskim opterećenjima kod benzinskog motora s direktnim ubrizgavanjem i fiksnom geometrijom usisa i ispuha dodatnim otvaranjem ispušnog ventila u taktu kompresije.

Zbog prirode rada benzinskog motora s približno stehiometrijskim omjerom zraka i goriva u gotovo cijelom rasponu opterećenja potrebno je vršiti regulaciju količine usisanog radnog medija. Kod klasičnih motora regulacija snage vrši se zaklopkom na usisu odnosno prigušenjem koje uzrokuje značajne gubitke kod izmjene radne tvari, odnosno utječe na ukupnu učinkovitost prema (3.4). Prethodno opisani efekt je osobito izražen kod niskih opterećenja gdje je potreba za prigušenjem veća. Za potrebe ovog istraživanja korišten je AVL-ov programski paket BOOST koji koristi kvazidimenzionalni model (qD) za simuliranje pojava unutar cilindra i jednodimenzionalni model (1D) za simuliranje usisa i ispuha. Kao model izgaranja korištena je Vibeova funkcija i Woschni model prijenosa topline. Shematski prikaz korištenog modela motora prikazan je na slici 26. Odabrani su parametri niskog opterećenja i brzine vrtnje koji približno odgovaraju NEDC ciklusu i to 2000 o/min i srednjeg efektivnog tlaka (*engl. Brake Mean Effective Pressure*) BMEP 2 bar, 3 bar i 4 bar kako za standardni model motora tako i za novi model.



Slika 26. Grafički prikaz testnog modela motora u programskom paketu AVL-Boost.

Ključni promatrani parametri su srednji indicirani efektivni tlak IMEP definiran prema (3.1), IMEP-hp odnosno srednji efektivni tlak u cilindru za vrijeme takta kompresije i ekspanzije te srednji efektivni tlak izmjene radnog medija za vrijeme takta usisa i ispuha PMEP. Omjer ovih dvaju tlakova IMEP-hp/PMEP je mjera za učinkovitost motora, a još se naziva i učinkovitost izmjene radne tvari k_{ex} (3.3). Indicirana učinkovitost motora η_i predstavlja učinkovitost pretvorbe kemijske energije goriva u mehaničku, prije mehaničkih gubitaka trenja (3.2), gdje se uvrštavanjem u (3.3) dobije izraz koji dovodi u vezu učinkovitost izmjene radne tvari s ukupnom indiciranom učinkovitosti (3.4).

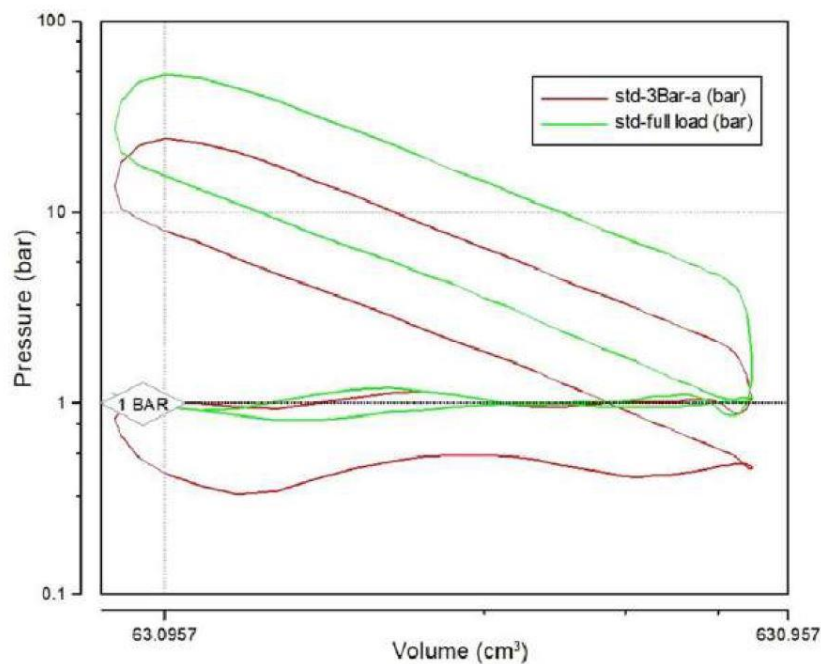
$$IMEP = IMEP_{hp} + PMEP \quad (3.1)$$

$$\eta_i = \frac{\int_{CD} p_c dv}{m_f h_d} = \frac{\frac{1}{V_c} V_c \int_{CD} p_c dv}{m_f h_d} = \frac{V_c IMEP}{m_f h_d} \quad (3.2)$$

$$k_{ex} = \frac{IMEP_{hp}}{|PMEP|} \quad (3.3)$$

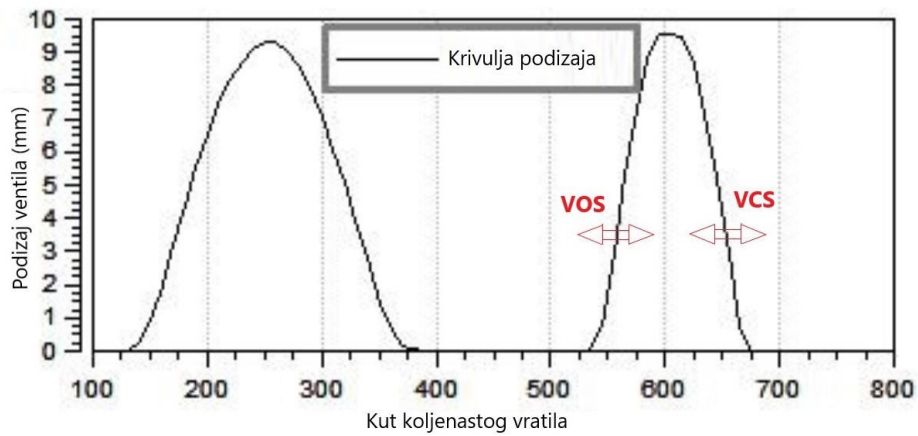
$$\eta_i = \eta_{hp} \left(1 - \frac{1}{k_{ex}}\right) \quad (3.4)$$

Prikaz gubitaka i učinkovitosti izmjene radne tvari najbolje je vidljiv u p-V dijagramu, dio ispod linije atmosferskog tlaka, točnije tlaka koji vlada u kućištu koljenastog vratila, a koji predstavlja gubitke u radu motora. Omjer površina koje zatvara petlja iznad linije atmosferskog tlaka IMEP-hp i površine koje zatvara petlja ispod te linije PMEP-a, predstavlja učinkovitost izmjene radne tvari. Iz dijagrama na slici 27. vidljiv je značajan pad učinkovitosti izmjene radne tvari kod djelomičnog opterećenja, isti je prikazan crvenom linijom.



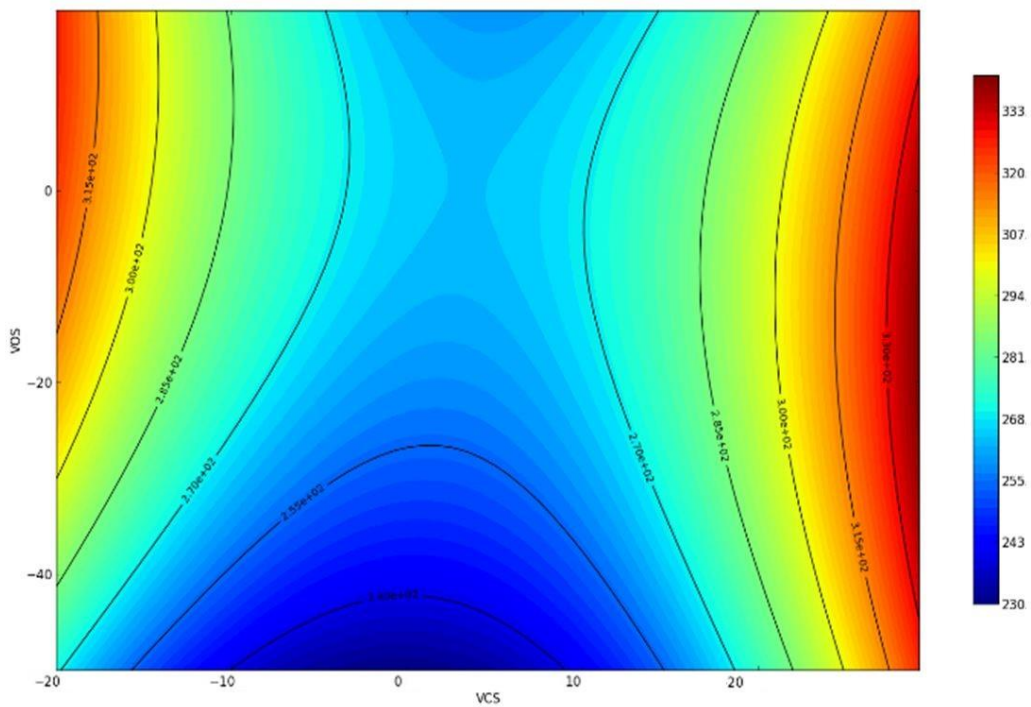
Slika 27. Indikatorski dijagrami testiranog motora [1].

Crvena krivulja na slici 27. prikazuje primjer rezultata indikatorskog dijagrama standardne verzije testiranog proračunskog modela pri 2000 o/min i srednjem efektivnom tlaku 3 bar, dok druga krivulja prikazuje tlak u istom cilindru pri jednakoj brzini vrtnje s potpuno otvorenom zaklopkom na usisu, tj. maksimalnim opterećenjem. Testni model motora raspolaže fiksnom fazom usisnih ventila i s mogućnošću potpune kontrole faze otvaranja i zatvaranja dodatnog ispušnog ventila radi smanjenja gubitaka za vrijeme usisa. Slika 28. prikazuje krivulju podizaja kod testiranja novog pristupa smanjenja gubitaka izmjene radne tvari dodatnim otvaranjem ispušnog ventila. Varijabla VOS pomiče kut otvaranja, a varijabla VCS kut zatvaranja dodatnog ispušnog ventila.

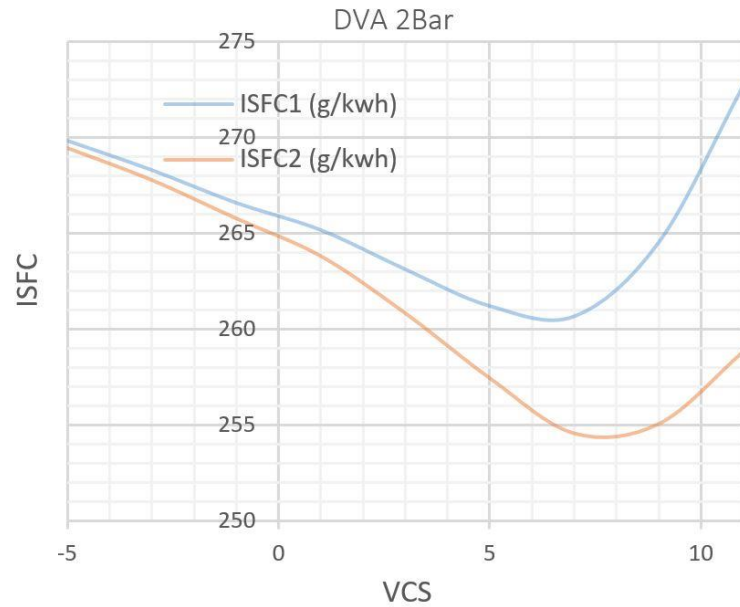


Slika 28. Podizaj ispušnih ventila u odnosu na kut koljenastog vratila.

Primjer rezultata simulacije prikazan je na slici 29. koja prikazuje ovisnost indicirane potrošnje goriva za opterećenje $BMEP = 2$ bar o pomacima kutova otvaranja i zatvaranja dodatnog ventila u odnosu na početno stanje opisano krivuljom podizaja.



Slika 29. Ovisnost ISFC-ja o pomaku VOS-a i VCS-a ($^{\circ}KV$) za 2 bar BMEP-a.



Slika 30. Ovisnost ISFC-ja o pomaku VCS-a (°KV) za 2 bar BMEP-a.

Tablica 2. Usporedba rezultata ispitivanja

		Standardni motor			DVA 2bar		DVA 3bar		DVA 4bar	
		2 bar	3 bar	4 bar	Rezultat	Promjena	Rezultat	Promjena	Rezultat	Promjena
BMEP	bar	2,00	3,00	4,00	2,00	0,00%	3,00	0,00%	4,00	0,00%
FMEP	bar	0,94	0,94	0,94	0,94	0,00%	0,94	0,00%	0,94	0,00%
IMEP-hp	bar	3,57	4,49	5,42	3,01	-15,69%	3,98	-11,36%	4,98	-8,12%
PMEP	bar	-0,63	-0,55	-0,48	-0,08	-87,30%	-0,07	-86,91%	-0,07	-85,21%
PMEP-i	bar	0,39	0,46	0,53	0,94	139,74%	0,94	104,35%	0,94	77,36%
PMEP-e	bar	-1,01	-1,01	-1,01	-1,02	0,69%	-1,01	0,00%	-1,01	0,00%
IMEP-hp/PMEP		5,67	8,16	11,29	37,63	563,97%	55,28	577,12%	70,14	521,17%
VCS	°CA				7,00		0,00		-7,00	
DVA-VC	°CA				672,00		665,00		658,00	
Efektivni komp. omjer	-	10,5	10,5	10,5	5,21	-50,43%	4,78	-54,52%	4,09	-61,08%
BSFC	g/kWh	397,1	333,1	300,1	382,88	-3,58%	320,21	-3,87%	289,36	-3,58%
ISFC	g/kWh	271,3	254,2	243,3	260,65	-3,93%	243,44	-4,23%	233,98	-3,83%
Učinkovitost motora	-	0,208	0,248	0,275	0,216	3,85%	0,258	4,03%	0,286	4,00%
Indicirana Učinkovitost	-	0,305	0,326	0,339	0,325	6,56%	0,342	4,91%	0,354	4,42%
Maksimalni tlak u cilindru	bar	19,7	24,2	28,7	16,04	-18,58%	20,25	-16,32%	24,71	-13,90%

Pronalazak optimalnog rješenja je dvodimenzionalni problem u ovisnosti o pomaku zatvaranja i pomaku otvaranja ventila, ali se za svako pojedino opterećenje može svesti na jednodimenzionalni, slika 30., jer se približno optimalni rezultati postižu za minimalne

vrijednosti VOS-a, koji je ograničen donjom granicom od 0 stupnjeva, odnosno početkom takta kompresije. Najmanja opterećenja motora zahtijevaju najdulje kutove otvaranja ventila zbog najvećeg viška radnog medija, s tim da je ograničavajući kut zatvaranja vezan za početak ubrizgavanja goriva u cilindar zbog čega učinkovitost za veće kutove naglo opada. Određeni su optimalni kutovi pomaka otvaranja od 7, 0 i -7 °KV-a za opterećenja 2, 3 i 4 bar BMEP-a te isti jako ovise o geometrijskim karakteristikama motora, s tim da korelacija između duljine otvorenosti i srednjeg efektivnog tlaka ostaje. Detaljni rezultati ispitivanja prikazani tablicom 2. pokazuju značajan napredak u odnosu na standardan motor s fiksnom geometrijom usisa i ispuha [1]. Specifična potrošnja goriva odnosno CO₂ emisije smanjene su između 3,83 % i 4,23 %, ukupni gubici izmjene plinova u cilindrima smanjeni su između 85 % i 87 %, dok je učinkovitost izmjene radne tvari porasla za više od šest puta čime je dokazana hipoteza rada [1]. Dobici smanjenjem gubitaka izmjene radne tvari nešto su manji od očekivanih zbog povećanih gubitaka topline. Zanimljiv je i podatak o maksimalnim tlakovima u cilindru, prvenstveno sa stajališta ekologije i trajnosti motora, koji su niži od 13,9 % do 18,6 % u odnosu na standardni motor pri jednakim opterećenjima. Najveći dobici ispitivanog pristupa su pri najmanjim opterećenjima i postignuti su minimiziranjem gubitaka izmjene radnog medija za vrijeme usisa, dok pri velikim opterećenjima benefiti ovakvog pristupa nestaju. Isti je motor uz dodatak kontrole usisnih ventila testiran u Atkinsonovu i Millerovu ciklusu koji su danas u serijskoj primjeni. Budući da su ostvareni slični rezultati s komercijalno ispitanim metodama, daljnji razvoj koncepta kod atmosferskih motora nije potreban. Ideja za primjenu ovakvog koncepta proizišla je iz područja prednabijanih motora koje može biti jedan od smjerova daljnjih istraživanja ovdje predloženog pristupa. Kod atmosferskih motora gornja granica tlaka koji vlada u cilindru je približno atmosferski tlak, dok je kod prednabijanih motora to tlak prednabijanja. Samim time imamo na raspolaganju veće područje povećanja učinkovitosti, i ne samo smanjenjem gubitaka tijekom usisa kod niskih opterećenja nego je moguće dobiti pozitivan rad korištenjem energije prednabijanja turbopunjača, bez namjernog narušavanja njegove učinkovitosti, kroz ekspanziju u cilindru tijekom takta usisa. Ako promatramo sa stajališta redukcije gubitaka izmjene radne tvari i toplinskih tokova, primijenjeni model predstavlja optimum između razine složenosti i kvalitete dobivenih podataka. Nedostatak modela u smislu točnosti je nemogućnost procjene utjecaja na promjene u učinkovitosti izgaranja zbog promjena u vrtloženju, za čiju je procjenu nužno korištenje značajno složenijeg trodimenzionalnog CFD modela komore izgaranja. S druge strane, unatoč univerzalnosti i visokoj razini točnosti u pogledu procjene emisija štetnih tvari, upotreba CFD modela je najčešće neprihvatljiva kod modeliranja emisija i modela potrošnje goriva kompletnih vozila,

zbog izrazite kompleksnosti i potrebe za velikim ljudskim i računalnim resursima, zbog čega je upravo fokus istraživanja premješten na proučavanje prihvatljivijih modela opisanih u preglednom poglavlju.

3.2. Predstavljanje modalnog modela hibridnog električnog vozila i analiza utjecaja kvara sustava za regulaciju emisija na njihov nastanak temeljena na metodi grupiranja snage

Iz opširnog proučavanja postojeće literature iz područja sustava za kontrolu emisija kroz objavljeni pregledni rad [2] kao i modeliranja MSUI-ja 1D/QD modelom u [1], proizašli su ključni zaključci o daljnjem smjeru istraživanja.

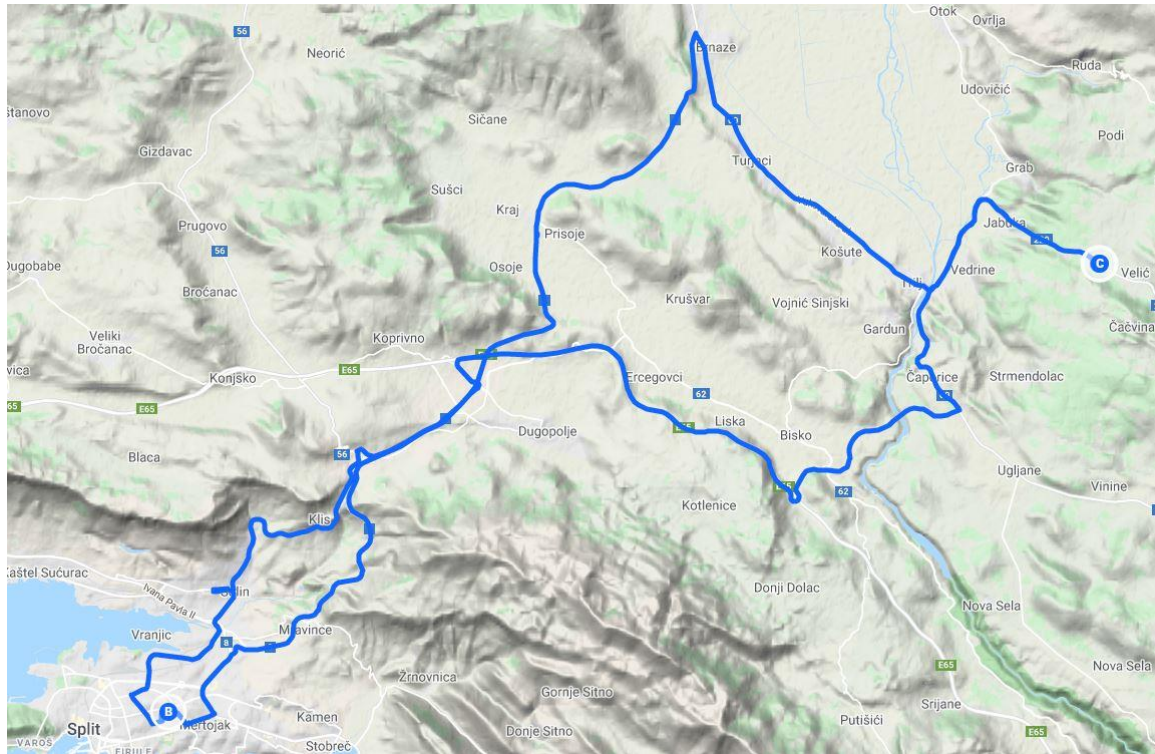
Najveći dio problema emisija cestovnih vozila vezan je za količine emisija štetnih tvari i emisija CO₂ u stvarnim uvjetima upotrebe kao i u trajnoj eksploataciji. Raskorak između emisija štetnih tvari novih vozila u stvarnim uvjetima upotrebe i graničnih vrijednosti odgovarajućih emisijskih propisa dobro je istražen nakon „Dieselgate“ afere [75, 125]. Postojeća istraživanja obuhvaćaju uglavnom novija vozila u početku eksploatacijskog perioda [75, 126] jer se relativno skupa istraživanja provode u razvijenim dijelovima svijeta. Količine emisija štetnih tvari neispravnih vozila, vozila u dugotrajnoj eksploataciji i prijedlozi načina rješavanja problema kontrole nisu dovoljno obrađeni u postojećoj literaturi.

Ključni problem sljedećih generacija vozila u cestovnom prometu je zadovoljavanje strogih emisijskih propisa u svim uvjetima upotrebe i ambiciozni planovi smanjenja emisija CO₂, što je nedostižno bez hibridnih pogonskih sustava. Problemi klasičnih vozila koje rješavaju hibridni pogoni vezani su za brzinu zagrijavanja katalitičkih sustava kontrole emisija, utjecaje sustava recirkulacije ispušnih plinova na brzinu odziva kod promjene opterećenja i bolju kontrolu opterećenja kod sustava s periodičnom regeneracijama poput regeneracije filtera čestica ili LNT katalizatora [2]. Kombinacija visoke složenosti sustava za kontrolu emisija i specifičnosti hibridnih pogonskih sustava stvaraju potrebu za kvalitetnijim modelima HEV-a u smislu točnosti predviđanja, dok je primjerice istraživanje [1] pokazalo da visoka razina složenosti CFD modele MSUI-ja čini neprikladnima u modeliranju vozila.

Iz navedene problematike je proizašlo pet hipoteza znanstvenog istraživanja objavljenog u [3]:

1. Količine emisija štetnih tvari vozila u eksploataciji, sa svim ispravnim komponentama za njihovo smanjenje, iznad su zakonom propisanih za vozila tipski odobrena prema NEDC laboratorijskom ciklusu ispitivanja u stvarnim propisanim uvjetima upotrebe.
2. Količine štetnih emisija u stvarnim uvjetima upotrebe vozila s kvarom sustava za kontrolu emisija višestruko premašuju zakonom propisane granice i kod vozila koja normalno prolaze tehničku kontrolu ispravnosti. Navedena su odstupanja izraženija kod vozila koja su tipski odobrena prema strožim emisijskim propisima.
3. Na temelju podataka iz stacionarnog ispitivanja, u sklopu godišnjeg periodičnog pregleda, moguće je utvrditi neispravnost sustava za kontrolu emisija dizelskih vozila bez investiranja u dodatnu opremu stanica za tehnički pregled.
4. Na osnovi modalne analize podataka o pogonskoj snazi, emisijama štetnih tvari i potrošnji goriva, uz primjenu toka energije, moguće je formirati modalne emisijske modele klasičnog i hibridnog vozila.
5. Na predloženi model moguće je primijeniti strategiju upravljanja energijom temeljenu na pravilima te odrediti maksimalne učinke hibridnog pogona u smislu smanjenja emisija štetnih tvari i potrošnje goriva.

Za mjerenje i procjenu emisija odabrana je metoda grupiranja snage [127] koja se temelji na Jimenezovoj VSP analizi [104]. Određivanje količine emisija ovom metodom temelji se na procjeni normizacijom na distribuciju standardne frekvencije snage te podrazumijeva njihovo mjerenje i bilježenje u stvarnim uvjetima vožnje na cesti uz uobičajene uvjete opterećenja i načina vožnje. Ispitivanja svih šest vozila provedena su na istoj ruti prikazanoj na slici 31.



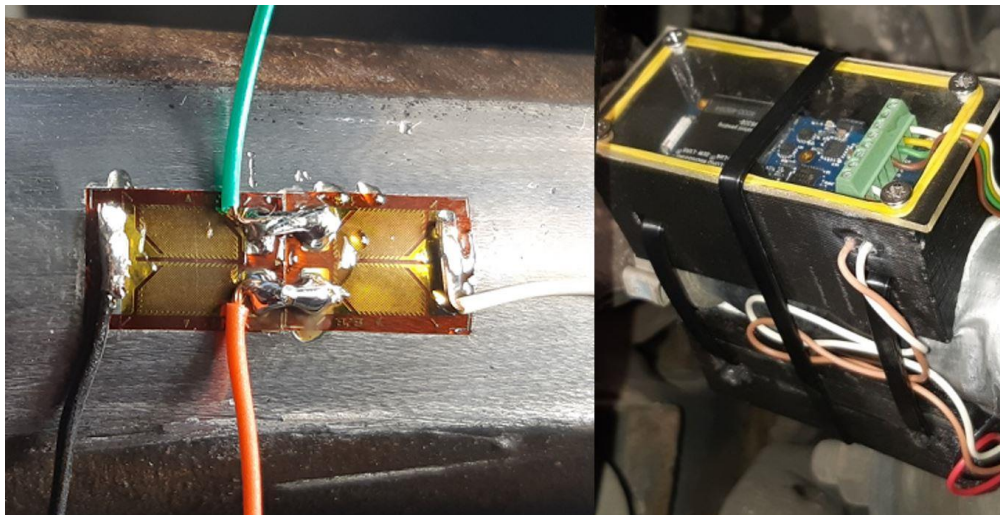
Slika 31. Prikaz testne rute na topografskoj karti.

Za mjerenje sastava ispušnih plinova korišten je analizator ispušnih plinova *MRU Vario Plus Industrial* čiji je princip mjerenja temeljen na elektrokemijskom efektu za mjerenje O_2 , NO i NO_2 te metodi nedisperzivne infracrvene spektrometrije za mjerenje CO , CO_2 , HC i SO_2 . Analizator plinova opremljen je Pittotovom cijevi za mjerenje brzine i sondom Pt100 za mjerenje temperature ispušnih plinova. Za potrebe ovog mjerenja izrađena je posebna mjerna cijev s prilagodljivim priključcima na ispušne cijevi svih ispitivanih vozila te priključcima za analizator i Pittot cijev, slika 32.



Slika 32. Oprema za mjerenje emisija postavljena na vozilo.

Snaga na pogonskim kotačima određena je iz momenta i kutne brzine kotača. Sustav mjerenja momenta na pogonskim kotačima također je izrađen u laboratoriju za toplinske strojeve i prilagođen je svakom vozilu zasebno. Moment je mjereno direktno postavljanjem tenzometarskih traka na pogonsku osovinu jednog kotača. Signal s rotirajuće osovine prikupljen je preko bežičnog programabilnog dvokanalnog predajnika *Sg-Link-OEM-LXRS* tvrtke *Lord Microstrain*, slika 33.



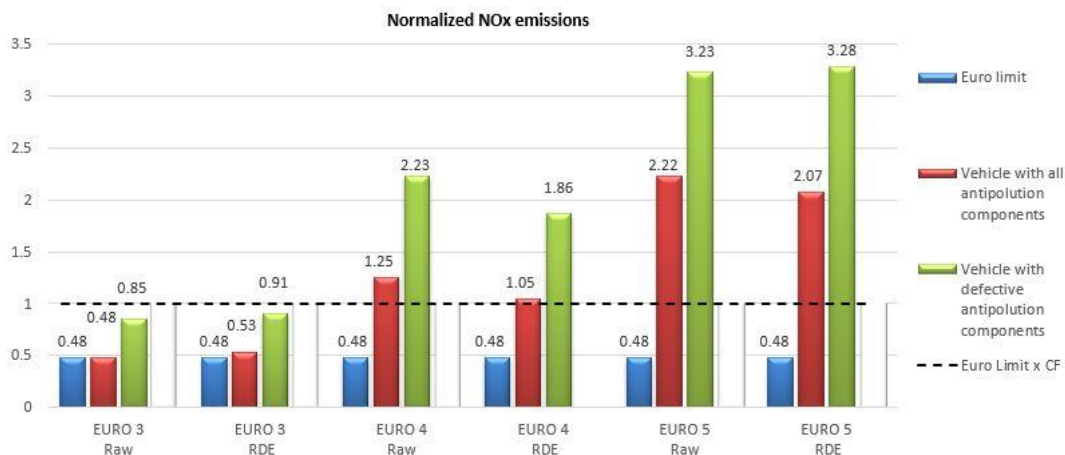
Slika 33. Mjerenje momenta direktno na pogonskoj osovini vozila.

Brzina vozila, nadmorska visina i prijeđeni put mjereni su i uz pomoć komunikacijskog sučelja temeljenog na ELM 327 koji preko OBD-a (*engl. On Board Diagnostic*) komunicira s računalima vozila. Brzina je mjerena preko broja okretaja pogonskih kotača, a korigirana signalom brzine s GPS-a.

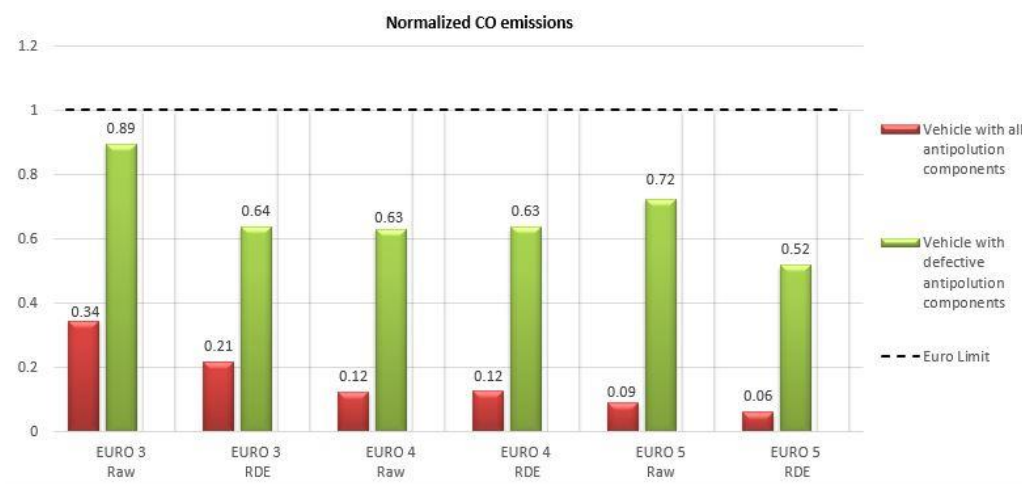
3.2.1 Emisije vozila pokretanih dizelskim motorima u stvarnim uvjetima upotrebe i analiza utjecaja kvara sustava za regulaciju emisija na njihov nastanak temeljena na metodi grupiranja snage

Rezultati provedenog istraživanja potvrđuju prvu hipotezu ovog rada, odnosno poznatu problematiku emisija ispušnih plinova u stvarnim uvjetima vožnje ispravnih vozila [125, 128]. Unatoč tome što su u svrhu ispitivanja korištena rabljena vozila s dugim periodom eksploatacije, rezultati mjerenja slični su očekivanim rezultatima za nova vozila. Iz dobivenih podataka vidljivo je da kod vozila sa svim ispravnim komponentama postoje značajna odstupanja između izmjerenih rezultata dobivenih RDE metodom grupiranja snage i graničnih vrijednosti emisija prema kojima je vozilo tipski odobreno. Odstupanje je veće kod novijih vozila, sa strožim emisijskim propisima. Uzrok odstupanja CO₂ emisija, odnosno potrošnje goriva, prikazanog grafikonom na slici 36. je isključivo u korištenju zastarjelog NEDC ciklusa tipskog odobrenja koji loše aproksimira stvarne uvjete upotrebe [75]. Uzrok značajnog odstupanja emisija NO_x-a u odnosu na deklarirane vrijednosti krije se u korištenju visokotlačnog sustava recirkulacije ispušnih plinova koji dobro funkcionira u NEDC uvjetima tipskog odobrenja, dok mu u stvarnim uvjetima upotrebe veća prosječna snaga MSUI-ja uz dinamičniju vožnju značajno reduciraju učinkovitost. Također normalan rad EGR sustava u takvim uvjetima nepovoljno djeluje na trajnost MSUI-ja, potrošnju goriva i PM/PN emisije [43]. CO emisije su znatno ispod propisanih granica zbog prirode rada motora u režimu siromašne smjese, kvalitetnog izgaranja u kombinaciji s visokoučinkovitim oksidacijskim katalizatorima [2].

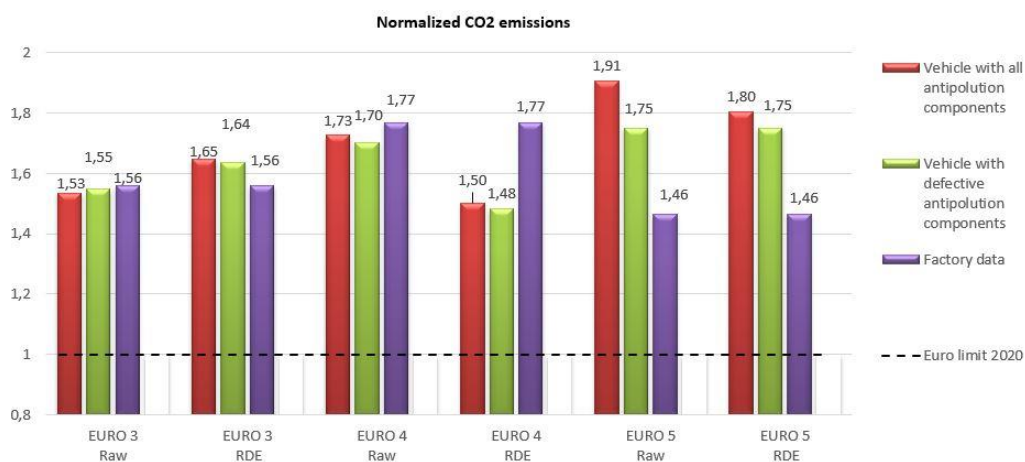
Drugi dio istraživanja daje uvid u problematiku vozila s neispravnim komponentama za kontrolu emisija koja je slabo zastupljena u literaturi. Kvarovi sustava za kontrolu NO_x emisija, u ovom slučaju većinom EGR, ali i DPF u određenoj mjeri, značajno povećavaju količine dušikovih oksida u ispušnim plinovima, grafikon na slici 34. Količina NO_x-a kod Euro 3 vozila je unutar granice propisane odgovarajućim emisijskim propisom, kod vozila s Euro 4 je veća za 86 %, a kod vozila s Euro 5 za 228 %, u odnosu na dopuštenu granicu s faktorom sukladnosti CF=2,1.



Slika 34. Usporedba jediničnih rezultata emisija NO_x-a u odnosu na granične vrijednosti za statistički standardizirane emisije prema RDE-u i neobrađeni podaci mjerenja [3].



Slika 35. Usporedba jediničnih rezultata emisija CO u odnosu na granične vrijednosti za statistički standardizirane emisije prema RDE-u i neobrađeni podaci mjerenja [3].



Slika 36. Usporedba jediničnih rezultata emisija CO₂ u odnosu na granične vrijednosti za statistički standardizirane emisije prema RDE-u i neobrađeni podaci mjerenja [3].

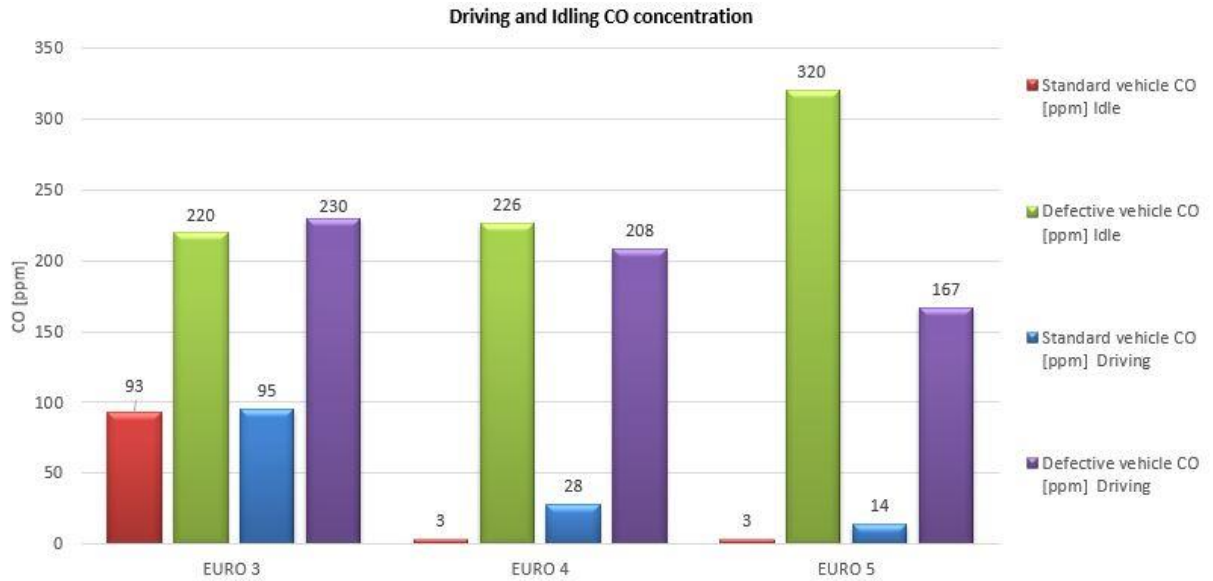
Veći značaj sustava za regulaciju emisija NO_x-a zabilježen kod novijih vozila, odnosno motora s višim emisijskim razinama, pripisuje se kvalitetnijim parametrima izgaranja s višim vršnim temperaturama i dobrom ispiranju cilindara koji pogoduju generiranju visokih koncentracija dušikovih oksida. Ovdje je za smanjenje NO_x emisija nužan rad s visokim koncentracijama recirkuliranih plinova u cilindru [43]. Količina CO₂ emisija i potrošnje goriva smanjila se neutralizacijom komponenti za kontrolu emisija kod svih ispitanih vozila, s tim da je zabilježen značajniji utjecaj kod Euro 5 vozila od oko 3 %, bez utjecaja regeneracije filtera čestica. Uzrok smanjenja potrošnje goriva je kvalitetnije izgaranje s višim vršnim temperaturama zbog izostanka EGR-a koji je kod strožih emisijskih standarda izraženiji, također su i veći povratni tlakovi katalitičkih pretvarača i finijih filtera čestica [56]. Za razliku od prosječnih normalnih uvjeta opterećenja, kod ekstremno niskih opterećenja zabilježena je do 10 % manja potrošnja goriva, odnosno CO₂ emisije ako je sustav recirkulacije ispravan. Ova se pojava može objasniti smanjenjem gubitaka izmjene radne tvari kod ispravnih sustava visokotlačnog EGR-a. Iz prethodno navedenog jasno je da je druga hipoteza uglavnom potvrđena s iznimkom CO emisija. CO emisije unatoč izostanku oksidacijskog katalizatora su unutar dozvoljenih granica, grafikon na slici 35. Iz navedenog proizlazi da nisu značajan problem kod vozila pokretanih dizelskim motorom unatoč značajnim povećanjem u odnosu na ispravna vozila. Kod Euro 5 vozila zabilježeno je povećanje od devet puta.

Detektiranje neispravnih ili uklonjenih komponenti za kontrolu emisija tijekom redovnih tehničkih pregleda predstavlja značajan problem jer ih najčešće nije moguće detektirati preko postojeće kontrole zabilježenih grešaka. Također mjerenja emisija u vožnji zbog visoke cijene i utroška vremena nisu opcija. Sva ispitana vozila normalno prolaze kontrolu tehničke ispravnosti unatoč neispravnim sustavima za kontrolu emisija. Predložena je i dokazana funkcionalnost koncepta na ispitivanim vozilima koja se temelji na mjerenjima u mirovanju s već postojećom opremom stanica za tehnički pregled, čime je potvrđena treća hipoteza ovog istraživanja.

Odsutnost ili neispravnost katalitičkog pretvarača moguće je dokazati povećanom koncentracijom CO i HC emisija. Izmjereno povećanje CO emisija u standardnoj vožnji kretalo

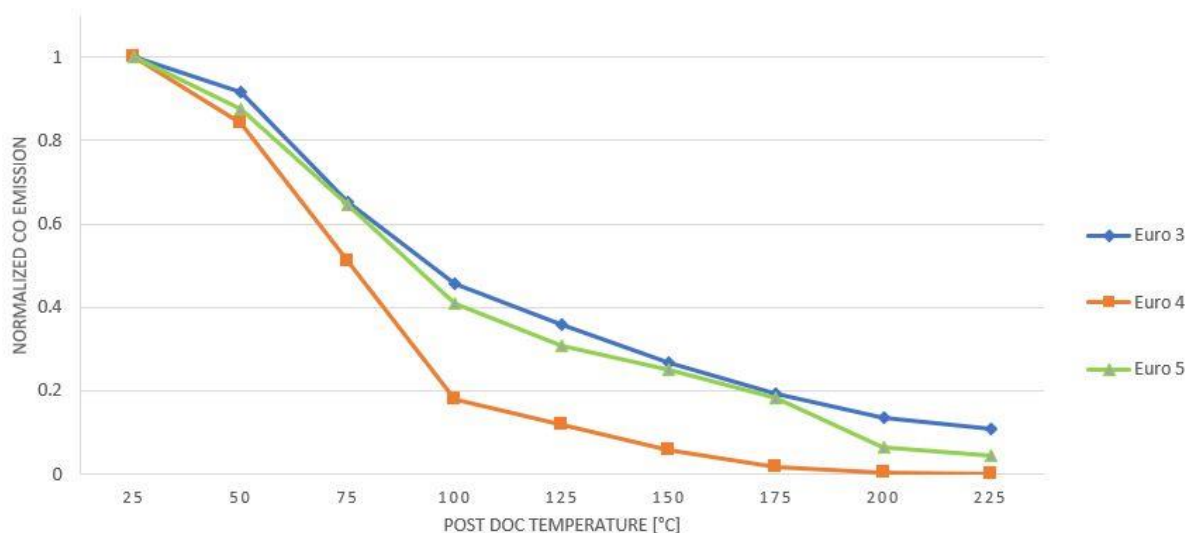
Poglavlje 3. Provedeno eksperimentalno i numeričko istraživanje i razvoj emisijskog modela

se između 200 % i 800 %, dok su koncentracije CO u praznom hodu porasle između 2.4 i 100 puta u odnosu na ispravna vozila, dijagram na slici 37.



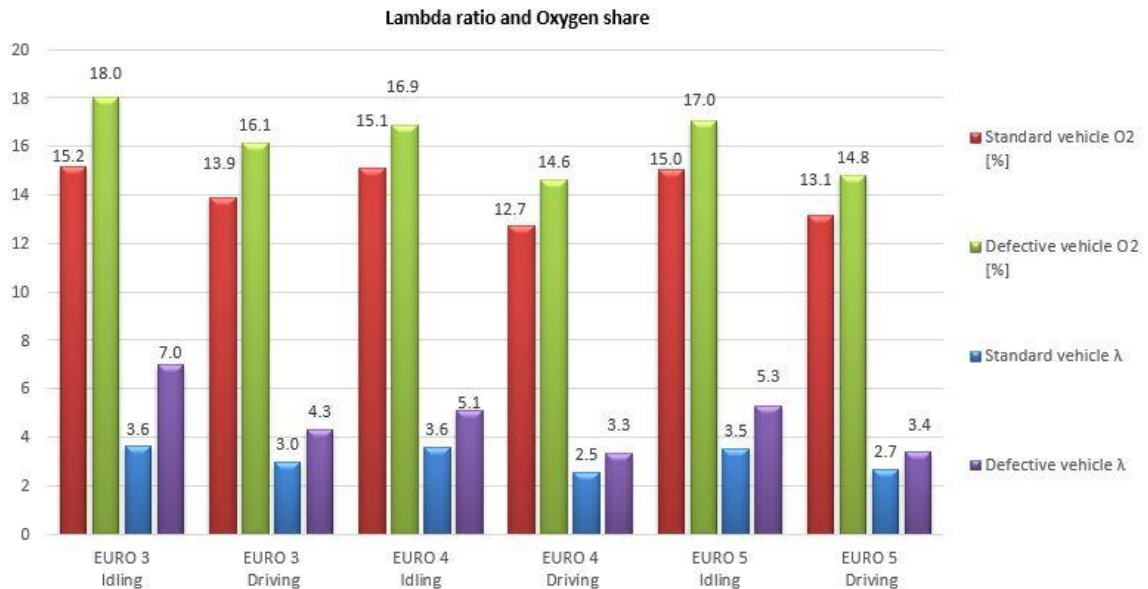
Slika 37. CO emisije u praznom hodu i u vožnji [3].

Na rezultate mjerenja CO i HC emisija u praznom hodu jako utječe temperatura oksidacijskog katalizatora [2]. Izmjerena ovisnost učinkovitosti oksidacijskih katalizatora o temperaturi prikazana je grafikonom na slici 38. Iz navedenog proizlazi da je potrebno osigurati njegovu povišenu temperaturu prethodnim radom na povišenoj brzini vrtnje i mogućom kontrolom preko OBD dijagnostičkog sučelja.



Slika 38. Učinkovitost oksidacijskog katalizatora u ovisnosti o temperaturi [3].

Dijagram na slici 39. prikazuje vezu između ispravnosti sustava recirkulacije ispušnih plinova EGR-a, tj. osnovnog sustava za kontrolu dušikovih oksida i omjera zraka i goriva ili pretička kisika, za vrijednosti u vožnji i za rad u praznom hodu. Prema rezultatima jedno od mogućih rješenja otkrivanja nepravilnosti je mjerenje omjera zraka i goriva.



Slika 39. Pretičak kisika u vožnji i praznom hodu [3].

Izmjereni odnos zrak/gorivo u ispušnim plinovima pri praznom hodu kod vozila s neispravnim sustavom za recirkulaciju ispušnih plinova povećan je za 94 % kod Euro 3 vozila, 43 % za Euro 4 i 51 % za Euro 5 vozila.

Za uspješnu primjenu prethodno navedenih postupaka dijagnostike potrebno je napraviti tipsku bazu modela ponašanja koja pokriva većinu modela vozila. Iz prikazanog se vidi da je potrebno napraviti minimalno podjelu prema pripadajućem emisijskom propisu. Daljnje istraživanje potrebno je usmjeriti prema mogućnostima grupiranja podataka u odnosu na primijenjene tehnologije kontrole emisija, snage i tipove vozila u svrhu pojednostavljenja izrade tipske baze podataka.

3.2.2. Predstavljanje modalnog emisijskog modela i modela potrošnje goriva hibridnog električnog vozila i primjena na ispitivano vozilo

Za formiranje emisijskog modela i modela potrošnje goriva HEV-a odabran je parametar trenutne pogonske snage odnosno specifične snage, čiji je analitički opis predstavljen u [104]. Odabran je zbog značajno bolje korelacije s emisijama i potrošnjom goriva u odnosu na ostale direktno mjerljive parametre iz literature i zbog mogućnosti povezivanja s energetskim tokovima HEV-a. Otpori vozila modelirani su polinomom drugog stupnja (3.5), čiji su koeficijenti određeni regresijskom analizom najmanjih kvadrata pomoću testa slobodnog uspoređivanja [129], iz čega proizlazi analitički opis (3.6)

$$f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^2 = m \frac{dv}{dt} \quad (3.5)$$

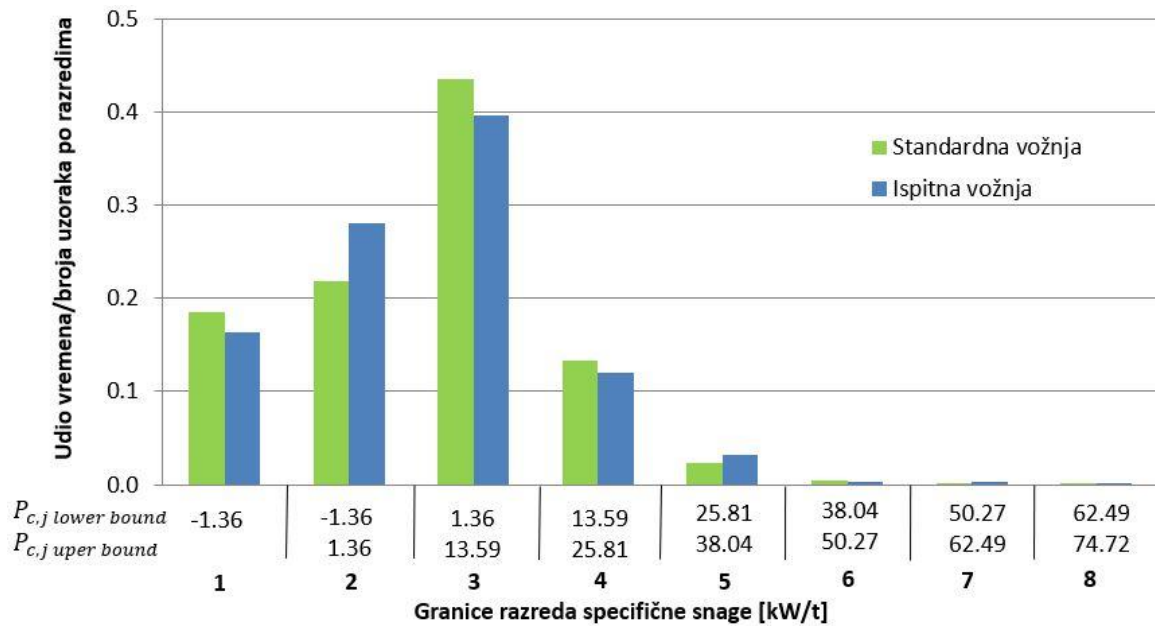
$$\begin{aligned} VSP &= \frac{\frac{d}{dt}(KE + PE) + F_{roll} \cdot v + F_{aero} \cdot v}{m} = \frac{\frac{d}{dt}(KE + PE) + F_{res} \cdot v}{m} \\ &= \frac{\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}m \cdot v^2 + mgh\right) + (f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^2) \cdot v}{m} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Model je kreiran kinematičkim unatražnim pristupom koji polazi od krajnjih komponenti vozila, odnosno kotača koji zahtijevaju određeni moment da bi slijedile ciklus [17]. Ovakav pristup ne zahtijeva regulaciju u vidu povratne veze koja funkcionira samo u vremenskoj domeni. Nedostatak je „slijepo“ praćenje ciklusa pa treba posebno voditi računa o odnosu maksimalnih performansi vozila u odnosu na zahtjeve ciklusa. Model se temelji na raspodijeli emisija unutar diskretnih raspona snage odnosno modalnih razreda. Polazna pretpostavka je da su odnosi količina prosječnih pojedinačnih emisija prema jediničnoj pogonskoj energiji približno jednak unutar promatranog raspona snage, bez obzira na vozni ciklus. Razvrstavanje u raspone vrši se prema granicama i uvjetima maksimalne odnosno minimalne snage pogona pojedinog raspone (3.7):

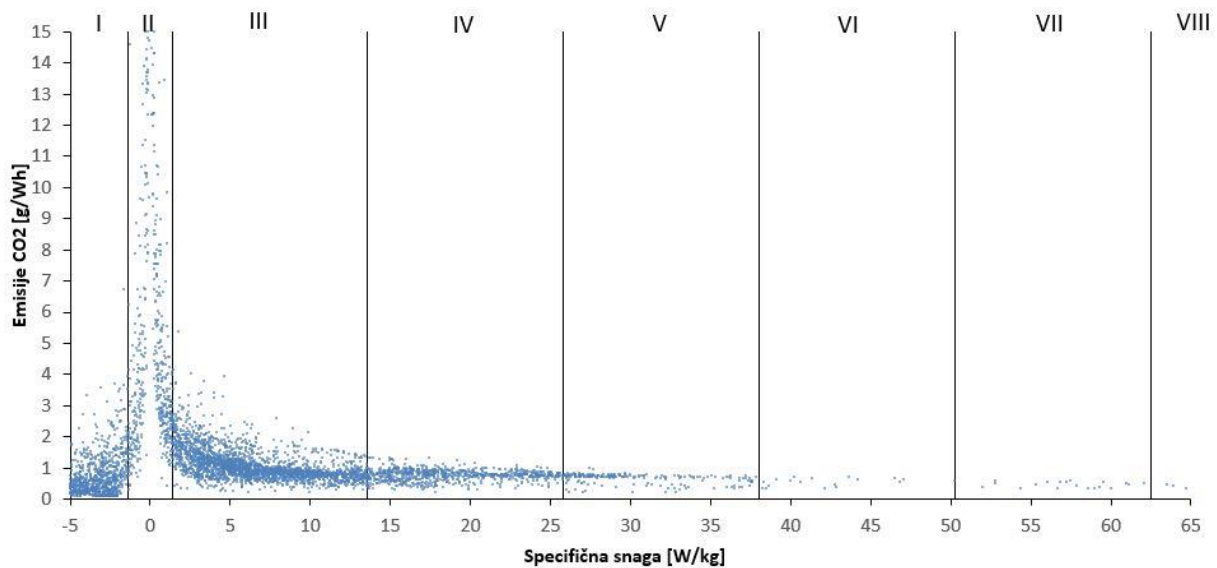
$$P_{c,j \text{ lower bound}} < P_{wheel} \leq P_{c,j \text{ upper bound}} \quad (3.7)$$

Broj i raspored razreda preuzet je iz metode procjene emisija pomoću grupiranja snage. Definiranje granica razreda normalizacijom u ovisnosti o parametrima vozila je detaljnije

opisano u [3]. Slika 40. prikazuje vremenski udio, odnosno udio broja podataka, za provedenu testnu i za standardnu vožnju.



Slika 40. Granice razreda snage i udjeli u standardnoj vožnji.



Slika 41. Izmjerene emisije CO₂ u razredima snage

Izmjereni podaci o specifičnim emisijama CO₂ raspoređeni u razrede snage su prikazani dijagramom na slici 41. Dodatno, teorijske postavke i matematički opis jedne krajnosti koja osigurava najtočniji opis, u kojoj broj razreda teži beskonačnosti, odnosno prelazak u područje kontinuirane varijable, predstavljene su i prilagođene modelu HEV-a u konferencijskom radu autora [130]. Emisije i potrošnja goriva j -tog raspona snage računaju se kao zbroj svih pomičnih

srednjih trenutnih vrijednosti masenog protoka $m_{x,j}$ pojedinačnih emisija x u vremenskom koraku k (3.8):

$$m_{x,j} = \sum_{\text{all } k \text{ in class } j} m_{x,k} \quad (3.8)$$

Pomične srednje trenutne vrijednosti se definiraju u trosekundnom vremenskom intervalu sa frekvencijom $k=1$ s. Izraz za pogonsku energiju j -tog raspona snage je definiran prema (3.9):

$$W_{tr,j} = m_{vehicle} \sum_{\text{all } k \text{ in class } j} VSP_{tr,k} t_k \quad (3.9)$$

Zbog manje osjetljivosti odabrana je definicija po jedinici pogonske snage u odnosu na klasičnu VSP definiciju modalnih emisija preko uprosječenog protoka u jedinici vremena. Vrijednost pojedinačnih emisija po jedinici pogonske energije j -tog razreda jednaka je omjeru ukupne količine emisija razreda i njegove ukupne pogonske energije (3.10):

$$\dot{m}_{x,j} = \frac{m_{x,j}}{W_{tr,j}} = \frac{\sum_{\text{all } k \text{ in class } j} m_{x,k}}{\sum_{\text{all } k \text{ in class } j} P_{tr,k} t_k} = \frac{\sum_{\text{all } k \text{ in class } j} m_{x,k}}{m_{vehicle} \sum_{\text{all } k \text{ in class } j} VSP_{tr,k} t_k} \quad (3.10)$$

Ukupna količina emisija, odnosno potrošnja goriva, dobije se zbrajanjem emisija svih pojedinačnih razreda, odnosno produkta specifičnih emisija i pogonske energije koja dolazi iz motora s unutarnjim izgaranjem prema (3.11):

$$M_x = \sum_j m_{x,j} = \sum_j \dot{m}_{x,j} W_{ice,tr,j} \quad (3.11)$$

Prema predloženom dijagramu toka energije orijentiranom prema funkciji [121], slika 23. pogonska energija j -tog razreda hibridnog vozila koju generira motor s unutarnjim izgaranjem $W_{ice,tr,j}$ je definirana s (3.12):

$$W_{ice,tr,j} = w_{tr,j} + w_{mwa,j} - \gamma_j \eta_g \eta_{st} \eta_m (\alpha \eta_{gb}^2 \eta_f^2 W_{br} + \eta_{gb} \eta_f W_{s,mwa}) \quad (3.12)$$

Gdje je:

$w_{tr,j}$ - pogonska energija j -tog razreda,

$w_{mwa,j}$ - pozitivna energija pomaka radne točke MSUI-ja j -tog razreda,

γ_j -koeficijent upliva pohranjene energije j -tog razreda,

$\eta_m \eta_g \eta_{st} \eta_{gb} \eta_f$ - redom predstavljaju učinkovitosti električnog stroja u motornom i generatorskom režimu, učinkovitosti baterije, mjenjača i završnog prijenosa,

W_{br} - je ukupna energija potrošena na usporavanje vozila definirana prema (3.13),

$W_{s,mwa}$ - je ukupna spremljena energija generirana pozitivnim pomakom radne točke MSUI-ja koja je definirana s (3.14),

$P_{e,j} - P_j$ - je razlika srednje snage MSUI-ja i zahtjeva snage pogona j -tog razreda

$$W_{br} = \sum_j W_{br,j} \quad (3.13)$$

$$W_{s,mwa} = \sum_j T_{j,mwa} (P_{e,j} - P_j) \quad (3.14)$$

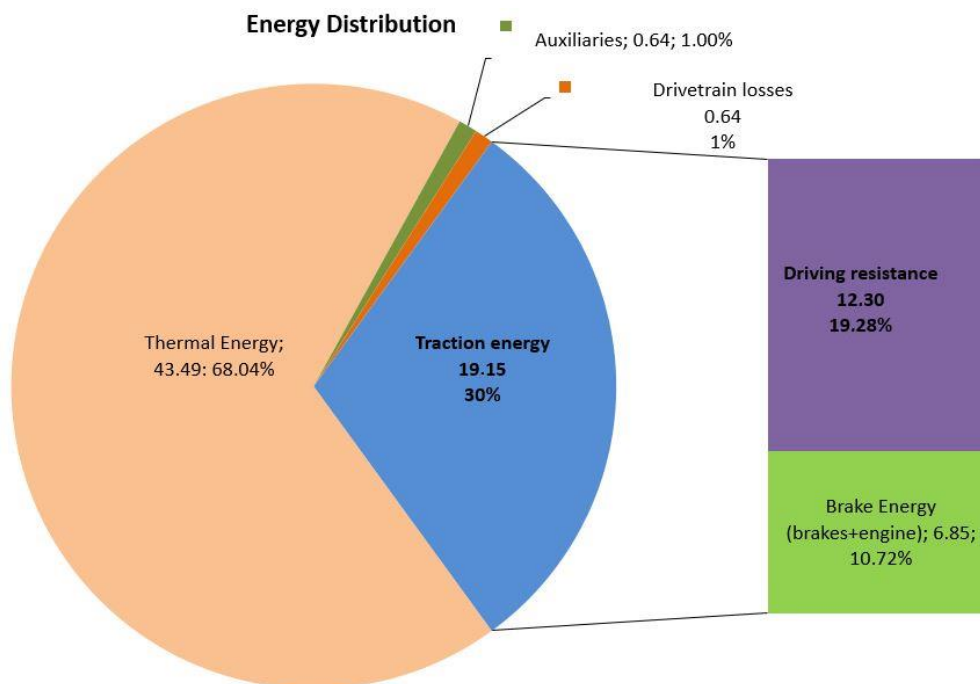
Potrebno je zadovoljiti uvjet energetske bilance (3.15) prema kojem se kompletna pogonska energija utroši na svladavanje otpora vozila, kočenje i promjenu potencijalne i kinetičke energije. Gdje su $w_{res,j}$ - otpori vozila; $w_{k,j}$ i $w_{p,j}$ - promjene u kinetičkoj i potencijalnoj energiji.

$$\sum_j w_{tr,j} = \sum_j W_{br,j} + w_{res,j} + w_{k,j} + w_{p,j} \quad (3.15)$$

Uvrštavanjem težinskih koeficijenata pripadajućih emisija A, B, C i D u općenitu funkciju cilja dobiva se konačna funkcija cilja (3.16).

$$J = \sum_j (\dot{A}m_{CO_2,j} + \dot{B}m_{NO_x,j} + \dot{C}m_{PN,j} + \dot{D}m_{CO,j}) [w_{tr,j} + W_{mwp,j} - \gamma_j \eta_g \eta_{st} \eta_m (\alpha \eta_{gb}^2 \eta_f^2 W_{br} - \eta_{gb} \eta_f W_{s,mwa})] \quad (3.16)$$

U svrhu primjene predloženog modalnog emisijskog modela klasičnog i hibridnog vozila provedena je analiza tokova energije kompletnog vozila na testnoj ruti na osnovi izmjerenih podataka. Prema izrazu (3.15) je procijenjen potencijal regenerativne energije, dijagram na slici 42. Od ukupne energije goriva gotovo 30 % pretvara se u koristan mehanički rad predan na pogonske kotače vozila. Od toga, veći dio mehaničke energije utrošen je na otpore vozila 69 % i on je nepovratan, a ostatak od 31 % je potrošen na kočenje i djelomično ga je moguće vratiti u sustav korištenjem regenerativnog kočenja.



Slika 42. Raspodjela energije vozila u stvarnim uvjetima vožnje.

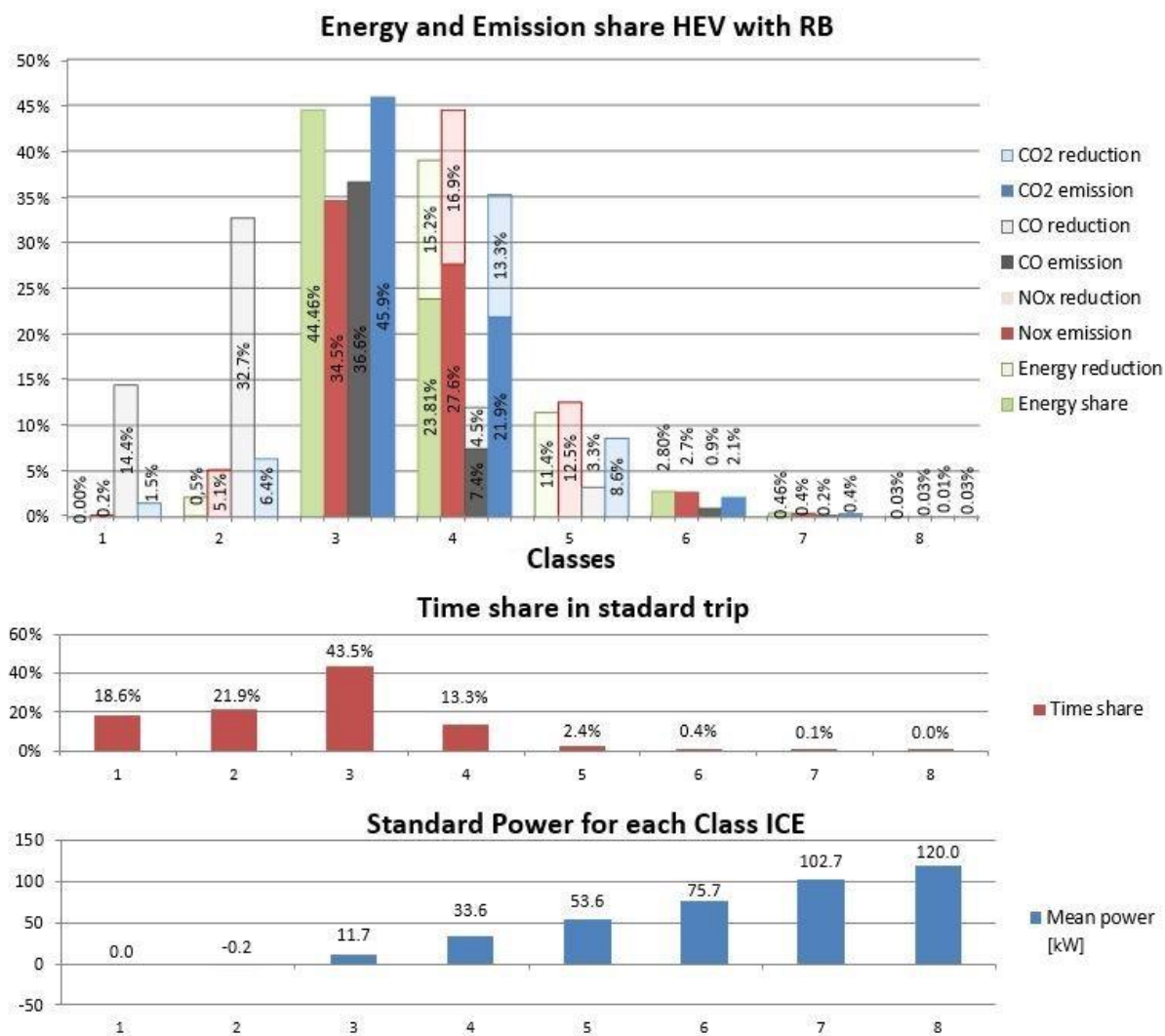
Nakon analize tokova energije napravljena je raspodjela količine emisija unutar pojedinih raspona pogonske snage i prikazana dijagramom na slici 43. Cilj je minimalizirati emisije NO_x-a prema funkciji cilja (3.17) uz zadovoljavanje uvjeta (3.15). U ovoj fazi istraživanja je korištena pojednostavljena funkcija cilja koja zanemaruje pomak radne točke MSUI-ja, te je $W_{s,mwa}=0$. Optimizacija je provedena permutacijom energetske udjele i pripadajućih emisija pojedinih razreda kao i korištenjem regenerativne energije koje omogućava hibridni pogon, što grafički prikazuje slika 43.

$$J = A \sum_j \dot{m}_{NOx,j} [w_{tr,j} + W_{mwp,j} - \gamma_j \eta_g \eta_{st} \eta_m (\alpha \eta_{gb}^2 \eta_f^2 W_{br})] \quad (3.17)$$

Rezultat prema jednostavnoj strategiji koja preferira minimalizaciju NO_x emisija također je prikazan stupčastim dijagramom na slici 43. Stupci prikazuju energetske udjele i emisijske udjele odnosno udjele potrošnje goriva klasičnog vozila u standardnim uvjetima vožnje, neovisno da li su sa ispunom ili transparentni. Kod hibridnog vozila dio toka energije iz MSUI-ja je zamijenjen tokom energije iz spremnika i predstavljen je transparentnim stupcima. Ispunjeni dijelovi stupaca predstavljaju udjele toka energije iz MSUI-ja koji su odgovorni za emisije i potrošnju. U prva dva razreda snage, prvi sa samo negativnom snagom bez pozitivnog

Poglavlje 3. Provedeno eksperimentalno i numeričko istraživanje i razvoj emisijskog modela

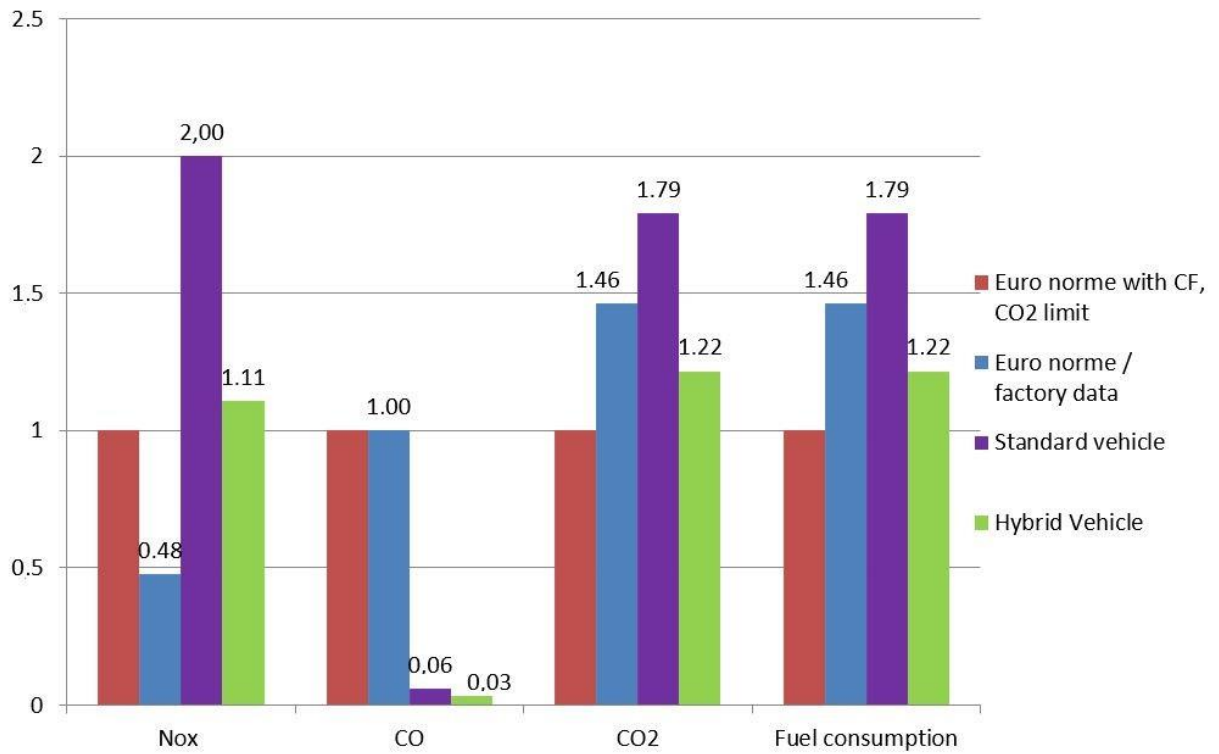
energetskog udjela, i drugi s pozitivnim energetskim udjelom manjim od 0,5 % ukupne mehaničke energije, zajedno su odgovorni za više od 46 % emisija CO, gotovo 8 % emisija CO₂ i 5 % emisija NO_x-a. Optimizacija orijentirana prema bilo kojim emisijama eliminira 1. i 2. razred jer im je udio u pogonskoj energiji vrlo mali dok je količina emisija značajna. Optimizacija prema emisijama CO₂ preferirala bi više razrede zbog više učinkovitosti dok ona primijenjena, prema NO_x emisijama preferira razred 3. Razredi od 6 do 8 nemaju značajniji



Slika 43. Raspodjela emisija i pogonske energije raspodijeljena prema rasponima snage [3].

energetski udio, a zahtijevaju pomicanje radne točke MSUI-ja tako da su ostali nepromijenjeni. Razred 5 je zbog relativno velikog udjela emisija NO_x-a u potpunosti zamijenjen spremljenom energijom, kao i dio razreda 4. Konačan rezultat na razini ciklusa predstavljen je grafički na slici 44. NO_x emisije reducirane su za gotovo 20 % u odnosu na početne vrijednosti, CO₂ i

potrošnja goriva reducirani su na 68 % početnih vrijednosti ili na 113g CO₂/km, dok su CO emisije dovedene na 31 % početne vrijednosti, odnosno na zanemariv iznos u odnosu na zakonsko ograničenje.

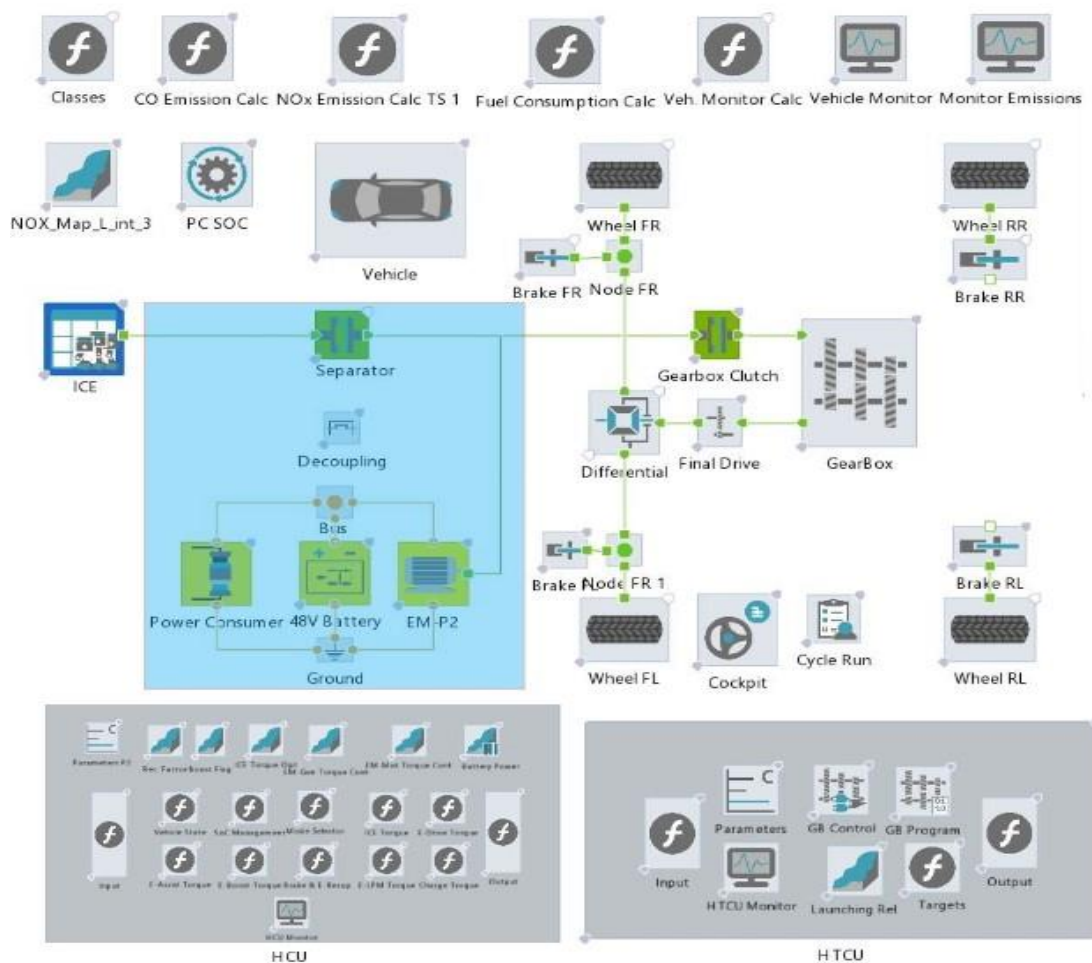


Slika 44. Usporedba emisija klasičnog i hibridnog pogona [3].

U radu je na osnovi modalne analize podataka o pogonskoj snazi, emisijama i potrošnji goriva, uz primjenu toka energije, formiran modalni emisijski model hibridnog vozila. Na predloženi model primijenjena je strategija upravljanja energijom temeljena na pravilima te su određeni maksimalni učinci hibridnog pogona u smislu redukcije emisija i potrošnje goriva. Ovime su potvrđene posljednje dvije hipoteze članka [3] koji čini doktorski rad, iako treba naglasiti da predstavljeni model nije uspoređen s eksperimentalnim rezultatima modeliranog hibridnog vozila niti s rezultatima poznatog modela, tako da je potrebno provesti njegovo vrednovanje u smislu točnosti predviđanja.

3.3. Validacija klasičnog i HEV modela na osnovi modalnih emisija i potrošnje goriva prema specifičnoj snazi

Nakon predstavljanja potpuno novog modela u [3] i detaljne analize obrađenih podataka utvrđeno je kako je u svrhu kvalitetnog vrednovanja modela potrebno koristiti znatno bolju opremu, prije svega analizatore plinova s kraćim vremenom odaziva. Potrebno je dokazati pretpostavku da predstavljeni model hibridnog vozila daje dovoljno dobre rezultate u vidu procjena, štetnih emisija, potrošnje goriva odnosno CO₂ emisija i pogonske energije u različitim ciklusima vožnje u usporedbi s referentnim modelom i uz primjenu jednake strategije upravljanja. S obzirom na tok energije i informacija, kontrolni model, prikazan na slici 45., formiran je unaprednim kvazistatičkim pristupom koji uključuje dinamiku samog vozila kroz PI regulator.



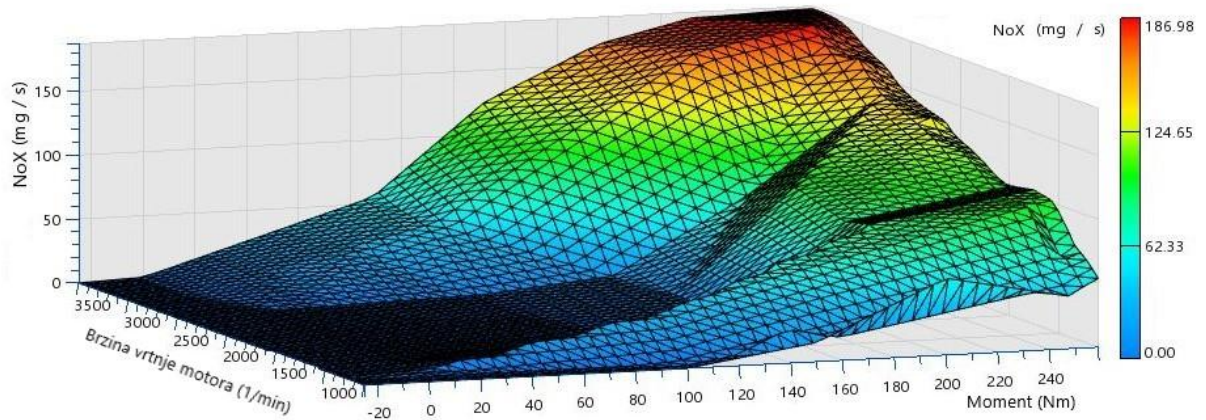
Slika 45. Shematski prikaz CruiseM modela.

Poglavlje 3. Provedeno eksperimentalno i numeričko istraživanje i razvoj emisijskog modela

Pojedini sklopovi opisani su karakterističnim fizikalnim veličinama dok se procjena emisija i potrošnje goriva oslanja na stacionarne pripadajuće mape motora s unutarnjim izgaranjem koji su generirani iz izmjerenih podataka na ispitnim valjcima. Emisije i potrošnja goriva mjerene su u stacionarnim radnim točkama kroz cijelo područje rada motora MSUI-ja. Slika 47. prikazuje ovisnost emisija NO_x -a o opterećenju i brzini vrtnje modeliranog MSUI-ja. Motorom upravlja kontrolna jedinica koja dobiva podatke iz svih sustava vozila te preko regulatora ostvaruje zadani ciklus. Detaljniji opis ostalih sustava koji utječu na dinamiku vožnje i kontrole rada modela vozila objašnjen je u radu [4]. Prijenosna oprema za mjerenje emisija AVL M.O.V.E instalirana je na ispitnom vozilu u svrhu mjerenja emisija onečišćujućih tvari i ugljikovog dioksida u stvarnim uvjetima vožnje te na ispitnim valjcima MAHA LPS 3000, slika 46.

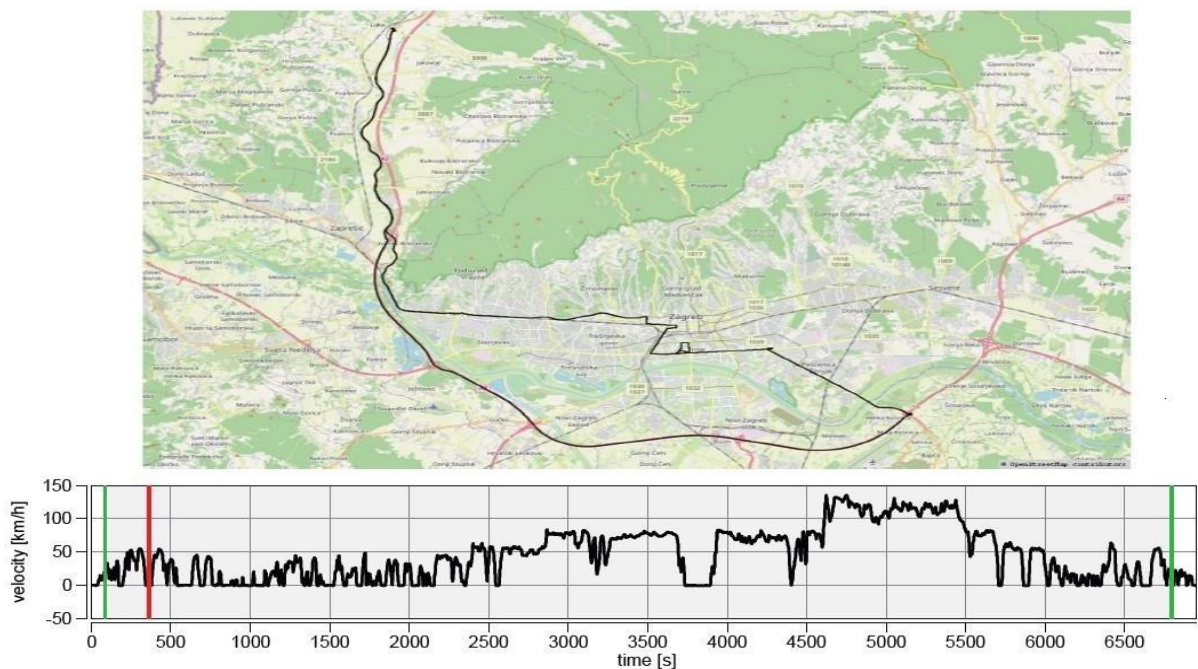


Slika 46. Vozilo na ispitnim valjcima s ugrađenom mjernom opremom.



Slika 47. NO_x emisijska mapa određena mjerenjem na ispitnim valjcima.

Mjerenja trenutne snage, potrošnje goriva i emisija bilježena su na ruti dugoj 87 km koja zadovoljava RDE kriterije mjerenja, sva su mjerenja izvedena prema proceduri RDE ispitivanja. Prikaz RDE rute i profil brzine prikazani su na slici 48.



Slika 48. Testna ruta i profil brzine tijekom ispitivanja.

Testiranje je provedeno na cestama bez značajnije promjene nadmorske visine i u uvjetima umjerenog prometa, što je rezultiralo ujednačenijom vožnjom sa samo 16 % reverzibilne energije. Raspodjela emisija i pogonske energije prema razredima snage prikazana je na stupčastom grafikonu na slici 49, gdje su sve energetske vrijednosti prikazane u odnosu na

ukupnu pozitivnu vučnu energiju RDE ciklusa, dok su emisije prikazane kao postotak ukupnih emisija nastalih tijekom ciklusa.

Predstavljeni modalni model formiran je na osnovi podataka mjerenja u RDE ciklusu i analitike prikazane u prethodnom poglavlju, dok je Cruise M formiran na osnovi izmjerenih podataka na ispitnim valjcima i kalibriran u RDE ciklusu vožnje. Relevantni parametri za usporedbu VSP modela klasičnog vozila i kontrolnog CruiseM modela klasičnog vozila prikazani su u tablici Tablica 3.

Tablica 3. Relevantni pokazatelji usporedbe predstavljenog i kontrolnog modela.

Classic Vehicle	RDE Cycle			RDE (1/km)				Deviation		
	Measured	CruiseM	VSP	Measured	CruiseM	VSP	CruiseM	CruiseM (%)	VSP	VSP (%)
Distance (km)	86.21	86.63	86.21	1.000	1.005	1.000	0.005	0.48%	0.000	0.00%
Positive traction energy (kWh)	13.37	13.33	13.46	0.155	0.154	0.156	-0.035	0.22%	0.092	0.69%
Negative traction energy (kWh)	-2.14	-2.22	-2.27	-0.0248	-0.0256	-0.0263	-0.080	3.26%	-0.130	6.08%
CO ₂ emission (g)	10,540	10,556	10,540	122.2	121.9	122.2	16.259	-0.33%	0.000	0.00%
NO _x emission (mg)	39,806	40,051	39,806	461.7	462.3	461.7	245.136	0.13%	0.000	0.00%
Consumption (kg)	3.366	3.371	3.366	0.039	0.039	0.039	0.005	-0.33%	0.000	0.00%

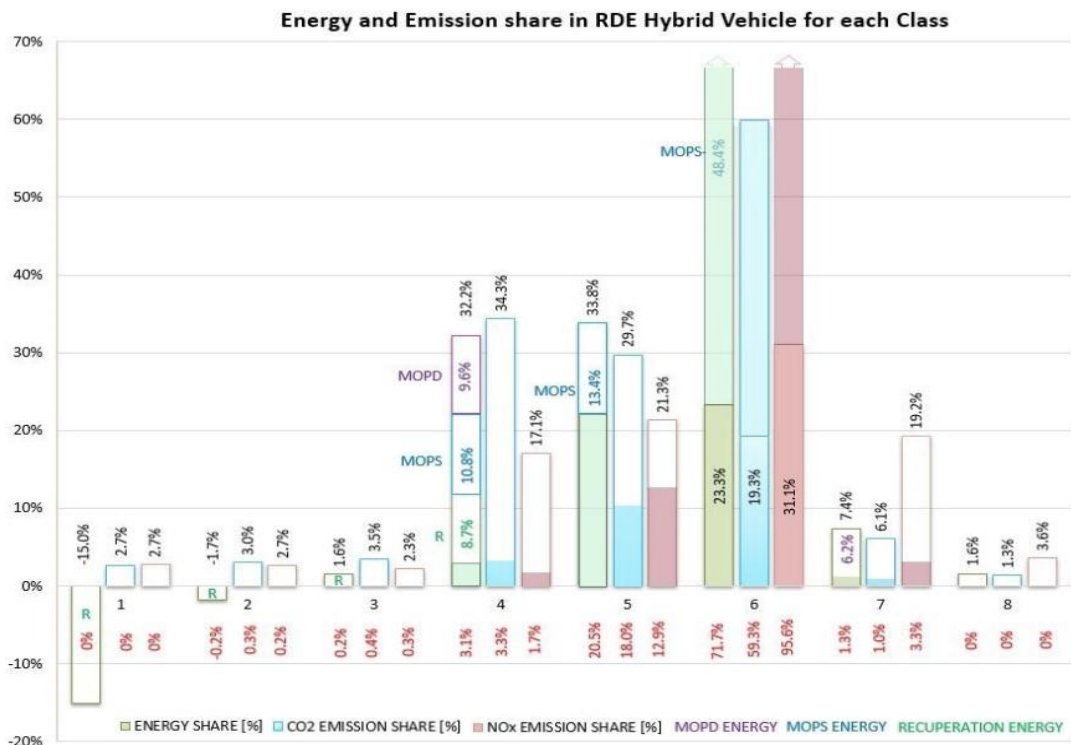
Prijeđeni put i emisije predloženog modalnog modela klasičnog vozila savršeno odgovaraju izmjerenim podacima jer je model nastao direktno iz tih parametara. Pozitivna i negativna vučna energija odstupaju od izmjerenih vrijednosti jer su određene integriranjem (3.6) na temelju trenutne specifične snage. Odstupanje prijeđenog puta CruiseM modela posljedica je unaprednog pristupa [17, 63], koji kontrolira brzinu pomoću PI regulatora. U ovom se pristupu ciklus vožnje ne prati savršeno jer uzima u obzir odziv sustava. Odstupanja pozitivne pogonske energije, udaljenosti, potrošnje goriva i emisije CO₂ unutar su 1 % od stvarnih vrijednosti, a što je prihvatljiv rezultat. Kalibracija regulatora povratne veze unaprednog modela izvršena je u RDE uvjetima što je utjecalo na smanjenje pogreške modela. Umjeren način vožnje na donjoj granici zahtijevane dinamike također je imao pozitivan utjecaj na rezultat CruiseM modela koji ne uključuje prijelazne pojave. Samo relativna negativna pogonska energija znatno odstupa između dva modela, dok je apsolutna devijacija mala zbog malog apsolutnog iznosa pogonske energije. Objašnjenje ovog odstupanja je jednako kao i kod odstupanja pozitivne energije.

Sljedeći korak bila je hibridizacija oba modela, modalnog i kontrolnog CruiseM modela u paralelnu hibridnu arhitekturu pod jednakim uvjetima. Oba hibridna modela testirana su i uspoređena u standardnim EU ciklusima: RDE, čiji je profil brzine identičan onome na kojem je izvršeno mjerenje, NEDC ciklus prema kojem je testno vozilo tipski odobreno i trenutno

važeci WLTC ciklus. Kontrolni model optimiziran je na temelju skupa jednostavnih pravila koja proizlaze iz globalne funkcije cilja (3.18). VSP model radi izvan vremenske domene tako da nema mogućnost optimizacije u stvarnom vremenu, ali se po istim pravilima mogu usporediti ova dva modela.

$$J = A \sum_j \dot{m}_{CO_2,j} [w_{tr,j} + W_{mwp,j} - \gamma_j \eta_g \eta_{st} \eta_m (\alpha \eta_{gb}^2 \eta_f^2 W_{br} - \eta_{gb} \eta_f W_{s,mwa})] \quad (3.18)$$

Prikaz raspodjele emisija, potrošnje goriva i pogonske energije hibridnog modela u RDE ciklusu vožnje prikazan je stupčastim dijagramom na slici 49A. Funkcija cilja preferira samo minimum emisija CO₂, odnosno potrošnje goriva zanemarujući ostale štetne emisije tako što su faktori uz ostale $B=C=D=0$, stoga optimizacija preferira srednje i više razrede snage u kojima motor s unutarnjim izgaranjem radi učinkovitije. S druge strane, najviši razredi generiraju visoke emisije NO_x, koje u ovom slučaju nisu kažnjene jer nisu obuhvaćene funkcijom cilja. Ako usporedimo CruiseM model s novim pristupom, odstupanja prijednog puta su vrlo mala s najvećom vrijednosti od 0,69 % kod hibridnog vozila i RDE ciklusa. Uzroci odstupanja leže u različitim pristupima modeliranju, odnosno unaprednom pristupu kod kontrolnog modela [63]. Sve pozitivne pogonske energije imaju pozitivna odstupanja VSP modela između 0.35 % kod WLTP modela klasičnog vozila, do najviše 2.85 % kod RDE hibridnog modela. Odstupanja negativne pogonske energije su veća, do 8.38 % što je i očekivano jer je riječ o malim apsolutnim iznosima u odnosu na pozitivnu energiju tako da mnogo ne remete ukupan rezultat. Najbitniji element usporedbe dvaju modela su CO₂ emisije, prikazane na slici 50, i potrošnja goriva gdje je najveće odstupanje rezultata zabilježeno kod hibridnog modela vozila u uvjetima RDE ciklusa od 3.79 % i kod klasičnog nehibridnog modela vozila u WLTP uvjetima od 4.4 %. Sve ostale kombinacije ciklusa i modela daju odstupanja oko 1 % što pokazuje vjerodostojnost modela.



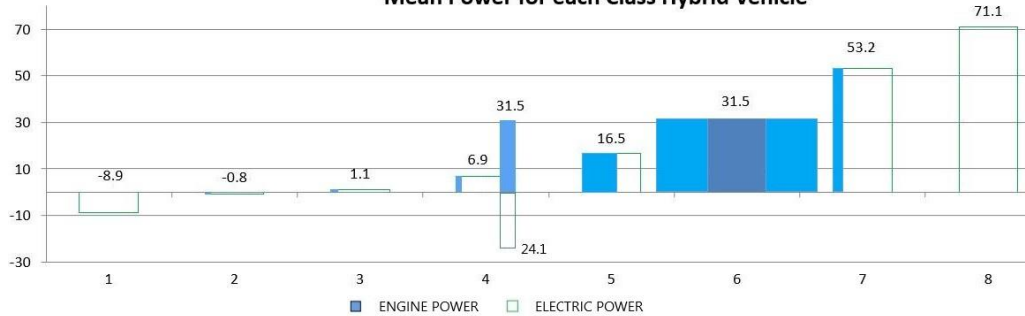
(A)

Time share in RDE Hybrid Vehicle



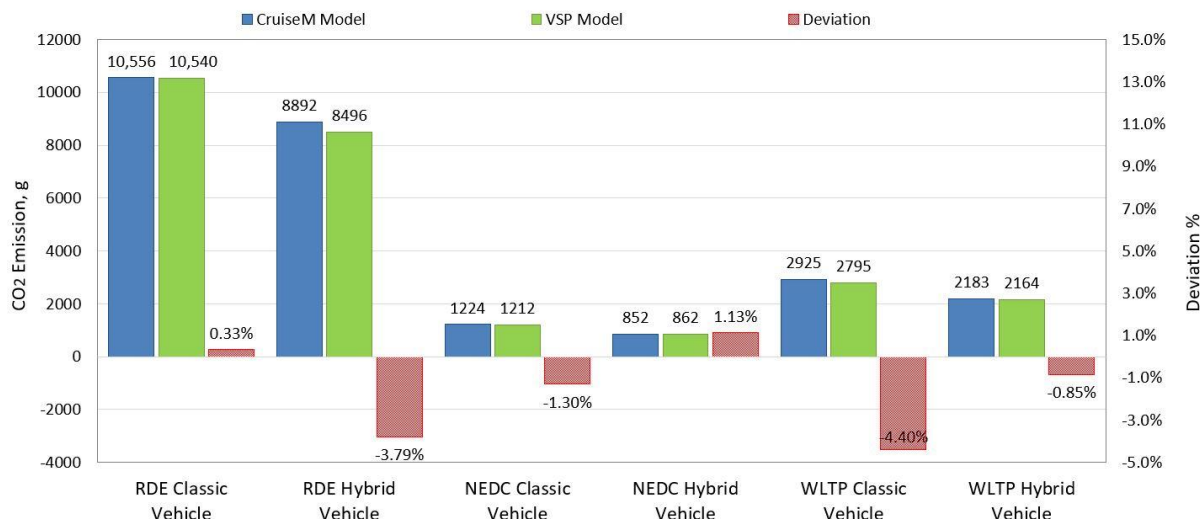
(B)

Mean Power for each Class Hybrid Vehicle



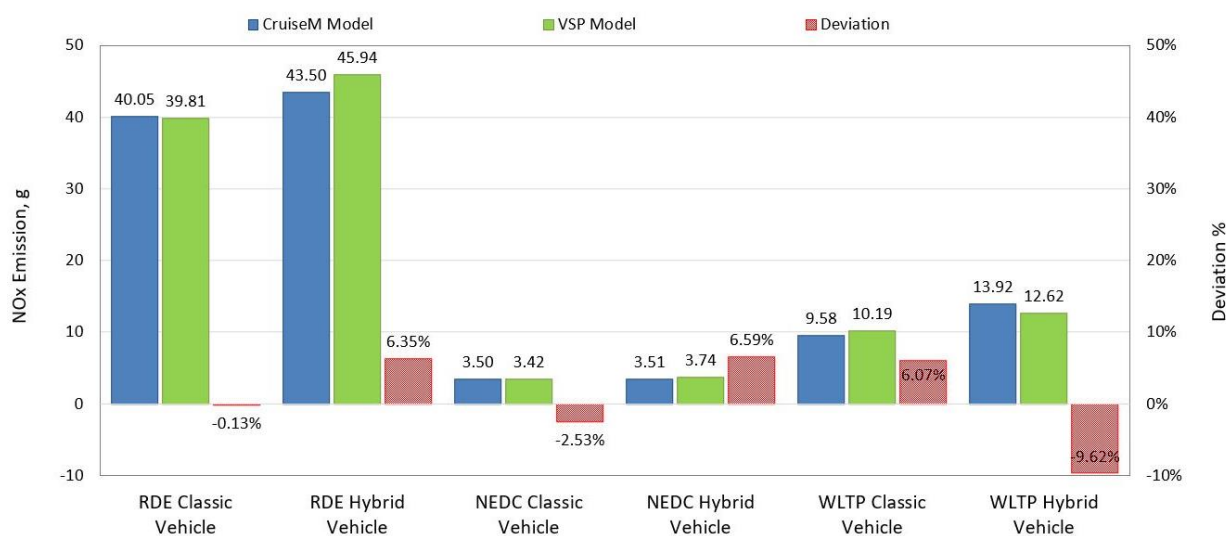
(C)

Slika 49. (A) Raspodjela energije i emisija VSP hibridnog modela u RDE uvjetima vožnje, (B) Vremenski udjeli razreda i (C) Prosječna snaga razreda.



Slika 50. Usporedba predviđanja emisija CO₂ za različite modele i cikluse [4].

Što se tiče rezultata usporedbe NO_x emisija, odstupanja su nešto veća u usporedbi s CO₂ emisijama i potrošnjom goriva, slika 51. Najveća odstupanja NO_x emisija od 9.62 % pokazuju modeli hibridnog vozila u WLTP ciklusu, dok isti modeli u NEDC i RDE ciklusima pokazuju odstupanja nešto veća od 6 %. Modeli klasičnih vozila u uvjetima RDE, NEDC i WLTP razlikuju se redom za 0.13 %, 2.53 % i 6.07 %. Veća odstupanja ovih emisija su i očekivana, osobito u dinamičnijem WLTP ciklusu, između ostalog i zbog lošijih performansi CruiseM modela u predviđanju NO_x emisija kontroliranih EGR sustavom koji je jako osjetljiv na prijelazne pojave koje nisu opisane ovim modelom.



Slika 51. Usporedba predviđanja emisija NO_x-a za različite modele i cikluse [4].

Ako usporedimo dobivene rezultate predloženog modela s rezultatima korigiranih modela na osnovi VSP analize iz literature [116-118], ukupne pogreške u procjenama emisija i potrošnje goriva su znatno manje, od nekoliko postotaka do višestrukog iznosa. Zhai u [118] testira vlastiti modalni model HEV-a s visokim stupnjem hibridizacije, koji u odnosu na standardni VSP dodaje logiku paljenja i gašenja MSUI-ja. Relativna pogreška modela u različitim ciklusima vožnje je kod CO₂ emisija i potrošnje goriva od -3 % do -12 %, dok je kod NO_x emisija od -43 % do 98 % u različitim ciklusima vožnje. Duarte u [116] korigira klasični VSP model dobiven u RDE uvjetima s linearnim korekcijskim faktorima dobivenim na osnovi podataka tipskog odobrenja; relativna odstupanja CO₂ emisija i potrošnje goriva HEV-a su između -9.3 do 8.5 % za različita vozila. Mera u [117] uvodi korekcijske mape u VSP modele klasičnih vozila sa start/stop sustavom, značajno podiže točnost osnovnog VSP modela s odstupanjima CO₂ emisija i potrošnje goriva između 3.9 % i 12.5 % za različita vozila. Svrha usporedivih modela iz literature je isključivo predviđanje emisija modeliranog vozila u različitim uvjetima upotrebe replicirajući naučeno ponašanje. Povećanje stupnja hibridizacije HEV-a negativno utječe na točnost predviđanja emisija i potrošnje goriva jer razlikovanje više izvora energije postaje ključan dio modela [115]. Predloženi model replicira ponašanje u drugačijim uvjetima kroz naučenu strategiju upravljanja energijom, na koju je moguće naknadno utjecati sa svrhom optimizacije što mu omogućava upotrebu i u razvojnoj fazi. Uključivanje toka energije s osnovnim elementima pogona čini ga upotrebljivim i kod najviših stupnjeva hibridizacije, odnosno kod PHEV vozila.

4. PREGLED OBJAVLJENIH RADOVA NA KOJIMA SE TEMELJI DOPRINOS

U ovom poglavlju predstavljene su sažeci objavljenih znanstvenih radova i doprinosi doktoranda svakom objavljenom radu.

4.1. Rad 1: Povećanje učinkovitosti izmjene radne tvari kod benzinskog motora pri djelomičnom opterećenju primjenom dvostrukog otvaranja ispušnih ventila

U ovom znanstvenom radu primarno je analiziran novi teoretski pristup povećanja učinkovitosti Ottovog motora, s direktnim ubrizgavanjem goriva u cilindar, smanjenjem gubitaka izmjene radnog medija kod djelomičnog opterećenja dodatnim otvaranjem ispušnih ventila u taktu kompresije. Rad predstavlja uvod u modeliranje motora s unutarnjim izgaranjem kao najsloženijeg dijela modela vozila. Istraživanje je provedeno na modelu motora u AVL-ovom programskom paketu Boost koji koristi 1D model usisnih i ispušnih sklopova motora te kvazidimenzionalni model za opise procesa unutar cilindra. Novina pristupa odnosi se na aktivno upravljanje dvostrukim otvaranjem ispušnim ventilima u svrhu smanjenja gubitaka izmjene radnog medija. Rezultati su pokazali višestruko povećanje učinkovitosti izmjene radne tvari jer je donja negativna petlja indikatorskog dijagrama svedena na minimalne vrijednosti, čime su gubici usisa svedeni na minimum. Održavanjem konstantnog srednjeg efektivnog tlaka, postavkama regulacije, površina gornje petlje je također smanjena za isti apsolutni iznos čime je posljedično smanjena potrošnja goriva. Modelom je dokazano povećanje učinkovitosti i smanjenje emisija CO₂ u područjima niskih opterećenja na razini Millerova i Atkinsonova ciklusa, koji su već u komercijalnoj upotrebi. Daljnje istraživanje koncepta ima smisla samo kod prednabijanih motora u vidu procjene mogućnosti korištenja pozitivnog rada predtlaka za vrijeme usisa. U odnosu na benzinski motor s fiksnom geometrijom usisa specifična potrošnja goriva u području promatranih niskih opterećenja između 2 i 4 bar srednjeg efektivnog tlaka je smanjena između 3,83 % i 4,23 %, a gubici izmjene plinova u cilindrima su smanjeni između 85 % i 87 %. Korišteni model primjeren je za istraživanja događaja vezanih za izmjene radne tvari, ali nedostatak modela u smislu točnosti je nemogućnost procjene utjecaja pristupa na promjene u učinkovitosti izgaranja zbog promjena u vrtloženju. Unatoč univerzalnosti i visokoj razini točnosti kod modeliranja motora, u pogledu procjene štetnih emisija vozila je upotreba CFD modela najčešće neprihvatljiva zbog svoje kompleksnosti.

4.1.1. Doktorandov doprinos radu

Doktorand je samostalno proveo numeričko prilagođavanje modela benzinskog motora za potrebe ispitivanja utjecaja promjene faze i vremena otvaranja ispušnih ventila za vrijeme takta kompresije na emisije odnosno potrošnju goriva. Izvršio je optimizaciju faze otvaranja i zatvaranja ispušnih ventila u svrhu minimalizacije potrošnje goriva te je proveo detaljnu analizu i usporedbu dobivenih podataka. U suradnji s mentorom i koautorom pripremio je rukopis za slanje u znanstveni časopis.

4.2. Rad 2: Analiza sustava za redukciju emisija ispušnih plinova dizelskih motora

U ovom preglednom radu napravljena je napredna analiza svih poznatih sustava za kontrolu emisija s naglaskom na najproblematičnije NO_x emisije i emisije čestica. Obuhvaćeni su sustavi koji djeluju na emisije u samom mjestu nastanka kao i sustavi za naknadnu obradu ispušnih plinova. U svrhu razumijevanja složenih analitičkih i fizikalnih modela ponašanja obrađeni su učinci gotovo svih utjecajnih parametara na svaki pojedini sustav zasebno, kao i problematika predviđanja emisija kod učestalih hladnih startova čiji je problem izraženiji kod hibridnih vozila. Literatura je pokazala iznimno složeno predviđanje ponašanja i svakog pojedinog sustava na pojedine emisije, ali i nedostatak u području istraživanja zajedničkog djelovanja više sustava. Analizirani su problemi koji su se javljali pri korištenju pojedinih metoda za smanjenje emisija u određenim uvjetima rada motora. Objašnjen je utjecaj sustava kontrole emisija na parametre rada motora kao i na potrošnju goriva, reakcija na promjenu opterećenja i trajnost. Glavni zaključak odnosio se na potrebu za sustavnijim pristupom koji uključuje istodobno sve primijenjene sustave za kontrolu emisija zbog međusobnog djelovanja jednog na drugi. Dane su smjernice s procjenom kvalitete funkcionalnosti pojedinih tehnika u vidu usporedbe različitih rješenja cjelovitih sustava kontrole emisija s aspekta učinka na najutjecajnije emisije, potrošnju goriva, održavanje, veličinu i cijenu izvedbe kao i mogući načini postizanja određenih emisijskih propisa.

4.2.1. Doktorandov doprinos radu

Ovaj rad iniciran je potrebom za razumijevanjem složenih modela ponašanja sustava za kontrolu emisija vozila pogonjenih motorima s unutarnjim izgaranjem i opširnim pregledom literature iz tog područja. Doktorand je zajedno s koautorima pripremio rukopis na temelju sustavnog pregleda literature koji objedinjuje sve komercijalno dostupne sustave kontrole

emisija unutar jednog rada, bilo da je riječ o sustavima koji utječu na emisije na mjestu njihova nastanka ili o sustavima za naknadnu obradu emisija. Ovakav je pristup bio nužan za objašnjenje rada svakog cjelovitog sustava kontrole emisija čije je ponašanje osim pojedinačnim podsustavima određeno i složenim međusobnim utjecajima. Doktorand je napravio konceptualnu usporedbu mogućih kombinacija pojedinačnih sustava s aspekta učinka na najutjecajnije emisije, potrošnju goriva, održavanje, veličinu i cijenu izvedbe.

4.3. Rad 3: Analiza emisija dizelskih vozila u okolnostima kvara sustava za regulaciju emisija

Rad predstavlja nastavak istraživanja koje se odnosi na utjecaj zakazivanja pojedinih sustava i na predstavljanje metode procjene emisija vozila, a što je uža tema doktorskog rada. Eksperimentalno istraživanje provedeno na vozilima u dugotrajnoj eksploataciji s potpuno ispravnim sustavima kontrole emisija pokazuje značajna odstupanja u odnosu na dopuštene granične vrijednosti odgovarajućih emisijskih propisa. Odstupanja su vrlo slična očekivanim vrijednostima za nova vozila iz čega proizlazi da degradacija sustava kontrole ne predstavlja značajan problem. Analizirana su odstupanja pojedinih emisija i razlike u ponašanjima između različitih generacija vozila uz objašnjenje uzroka problema. Na vozilima sa simuliranim kvarovima rezultati mjerenja pokazali su višestruko povećanje štetnih emisija u slučajevima otkazivanja komponenti, odnosno sustava za njihovu kontrolu. Najveći su problem emisije NOX-a dok su emisije CO unatoč ogromnom povećanju ispod dozvoljenih granica i ne predstavljaju problem. Ukidanje pojedinih komponenti za kontrolu emisija uglavnom pozitivno utječe na ekonomičnost što je očekivano s obzirom na načine djelovanja objašnjene u [2]. Ustanovljena je samo iznimka kod izrazito niskih opterećenja gdje EGR sustav pridonosi smanjenju potrošnje goriva, što se može objasniti smanjenjem gubitaka izmjene radne tvari. Predloženi su i dokazani mogući modeli detektiranja kvarova DOC i EGR sustava u sklopu STP-a korištenjem trenutno postojeće opreme i dane su smjernice daljnjih istraživanja. Istraživanje je pokazalo da su novija vozila, koja zadovoljavaju novije emisijske propise, osjetljivija na kvarove komponenti za kontrolu emisija u odnosu na prethodne generacije. U ovom je radu na osnovi modalne analize i odgovarajućeg toka energije predložen novi model za predviđanje emisija i potrošnje goriva klasičnih i hibridnih vozila. Predloženi model primijenjen je na ispitivano vozilo s ispravnim sustavima kontrole emisija na osnovi zabilježenih podataka o emisijama, potrošnji goriva te energiji u stvarnim uvjetima upotrebe. Dodavanjem unutarnjih varijabli razvijeni model je moguće primijeniti na hibridni sustav pogona zbog mogućnosti razlikovanja pojedinih izvora energije. Pokazano je da se na model

može primijeniti jednostavna strategija upravljanja energijom temeljena na pravilima s ciljem optimizacije CO₂ emisija u uvjetima koji repliciraju stvarne uvjete upotrebe. Usporedbom fizikalne interpretacije pojedinih unutarnjih varijabli može se zaključiti da, za razliku od predloženog modela, postojeći modalni modeli nisu prihvatljivi kod najviših stupnjeva hibridizacije HEV-a. Dobiveni rezultati emisija i potrošnje goriva nisu uspoređeni s eksperimentalnim podacima, ali su unutar očekivanih vrijednosti.

4.3.1. Doktorandov doprinos radu

Doktorandovo istraživanje motivirano je problematikom predviđanja emisija u stvarnim uvjetima upotrebe klasičnih i hibridnih vozila i otkazivanja određenih sustava za kontrolu emisija čiji je rok trajanja u pravilu kraći od samog vozila. Izostanak kontrole ispravnosti i prisutnosti sustava za regulaciju emisija tijekom obaveznih redovnih pregleda uz visoku cijenu zamjene često rezultira nastavkom korištenja vozila bez njih. Doktorand je samostalno osmislio kompletan eksperiment te je uz pomoć mentora i kolega izradio i kalibrirao dio eksperimentalne opreme, a postojeći dio prilagodio i ugradio na sva ispitivana vozila. Izvršio je eksperimentalna mjerenja u cestovnim uvjetima upotrebe na ukupno šest vozila s potpuno ispravnim i neispravnim komponentama za kontrolu emisija. Također je proveo analizu izmjerenih rezultata te predstavio način kontrole izostanka odnosno neispravnosti pojedinih sustava s postojećom opremom STP-a. Doktorand je u radu predložio novi modalni model predviđanja emisija i potrošnje goriva vozila s naglaskom na hibridna vozila. Na jedno od ispitivanih vozila primijenio je predloženi model, na osnovi podataka izmjerenih u stvarnim uvjetima, upotrijebio je te analizirao dobivene podatke. Zajedno s mentorom i suradnicima pripremio je rukopis za slanje u časopis.

4.4. Rad 4: Novi model hibridnog vozila na osnovi analize emisija i potrošnje goriva prema specifičnoj snazi

U ovom izvornom znanstvenom radu izvršeno je vrednovanje novog razvijenog modela emisija i potrošnje goriva vozila s naglaskom na HEV. Model se temelji na modalnim emisijama i potrošnji goriva prema trenutnoj specifičnoj pogonskoj snazi vozila. Energetski tokovi opisani su fizikalnim modelima prema novom predloženom dijagramu toka energije temeljenom na funkcionalnim pojedinačnim tokovima HEV-a. Model se zasniva na stvarnim emisijama vozila, potrošnji goriva i energije koji su zabilježeni u stvarnim uvjetima vožnje prema pravilima Real Driving Emissions (RDE), koja su danas obvezni dio procesa tipskog

odobrenja vozila. Provedena je evaluacija novouvedenog modela u RDE, NEDC i WLTP ciklusu usporedbom rezultata sa standardnim, verificiranim modelom vozila koji je izrađen u AVL-ovu programskom paketu CruiseM. Na oba modela HEV-a primijenjena je ista strategija upravljanja energijom temeljena na nizu jednakih pravila. Pozitivne pogonske energije bilježe odstupanja između 0,35 % i 2,85 %. Najveće odstupanje u emisijama CO₂ zabilježeno je kod HEV modela u RDE ciklusu i kod nehibridnog modela u WLTP ciklusu od 3,79 % odnosno 4,4 %, sve ostale kombinacije ciklusa i vozila imale su odstupanja oko 1 % na razini kompletnog ciklusa. Očekivano, najveća relativna odstupanja zabilježena su za emisije NO_x od 0,13 % do 9,62 % za HEV u WLTP ciklusu. U usporedbi s postojećim emisijskim modelima i modelima potrošnje goriva HEV-a temeljenim na modalnim emisijama iz poglavlja 2, predstavljeni model HEV gotovo u svim segmentima pokazuje manju relativnu pogrešku procjene emisija i potrošnje goriva na razini kompletnog ciklusa.

4.4.1. Doktorandov doprinos radu

Doktorand je samostalno osmislio način provedbe istraživanja te je u suradnji s kolegama splitskog FESB-a i zagrebačkog FSB-a izvršio snimanje podataka na odabranom vozilu u RDE uvjetima vožnje i na ispitnim valjcima. Iz dobivenih podataka razvio je model klasičnog i hibridnog vozila temeljen na VSP analizi emisija i potrošnje goriva čije je teorijske osnove prikazao u radu. Zajedno sa suradnicima razvio je i verificirao kontrolni fizikalni model klasičnog i hibridnog električnog vozila u specijaliziranom AVL-ovu paketu CruiseM. Također je analizirao i usporedio rezultate predstavljenog modela s rezultatima kontrolnog modela istih vozila u RDE, NEDC i WLTC uvjetima korištenja vozila. Na kraju je zajedno s koautorima pripremio rukopis za slanje u znanstveni časopis.

5. ZAKLJUČAK

S obzirom na povećanje transportnih potreba s jedne strane i težnje za samoodrživosti s druge, neizbježno je okretanje prema tehnologijama koje značajno pridonose smanjenju štetnih emisija, a time i emisija stakleničkih plinova. S obzirom na zahtjeve nadolazećeg Euro 7 emisijskog propisa kao i planove o strožim ograničenjima CO₂ emisija, hibridna električna vozila postaju jedno od ključnih rješenja tranzicijskog perioda prema CO₂ neutralnim vozilima. Uz primjenu sintetičkih, CO₂ neutralnih goriva, hibridni pogonski sustavi će nakon tranzicijskog perioda, uz udio u standardnom cestovnom prometu, sigurno pronaći svoju primjenu u civilnim vozilima posebnih namjena, terenskim i vojnim vozilima bez obzira na stupanj elektrifikacije cestovnog prometa i na druge alternativne pogonske sustave.

Problemi vezani za štetne emisije, sustave za njihovu kontrolu i emisije CO₂ kod novih vozila, kao i u eksploataciji, ostat će jedan od budućih izazova, ali sa specifičnostima koje nose hibridni pogonski sustavi. Daljnji napredak u stupnju učinkovitosti ide primarno u dva osnovna smjera. Jedan se odnosi na povećanje učinkovitosti svih pojedinačnih sustava, prvenstveno motora s unutarnjim izgaranjem, dok se drugi odnosi na primjenu učinkovitih strategija upravljanja za koje su ključni kvalitetni modeli HEV-a. Značajno povećanje broja komponenti u odnosu na klasične pogonske sustave je neizbježno, što uz najmanje dva izvora energije predstavlja izazov u smislu modeliranja i procjene emisija kao i potrošnje goriva u stvarnim uvjetima upotrebe. U ovom radu analizirani su problemi vezani za učinkovitost i emisije u stvarnim uvjetima upotrebe kao i u trajnoj eksploataciji. Nadalje, razvijen je te verificiran modalni model emisija i potrošnje goriva hibridnog električnog vozila koji predstavlja značajan iskorak u odnosu na postojeće stanje.

U prvoj fazi istraživanja provedeno je testiranje novog koncepta povećanja učinkovitosti benzinskog motora smanjenjem gubitaka prilikom izmjene radne tvari, a koji se zasniva na dvostrukom otvaranju ispušnih ventila. Rezultati istraživanja pokazali su značajno smanjenje potrošnje goriva i CO₂ emisija kod niskih opterećenja čime je potvrđena osnovna hipoteza tog rada. Manji dobiti na učinkovitosti u odnosu na očekivane vrijednosti objašnjeni su djelomičnim poništavanjem pozitivnog utjecaja zbog povećanih gubitaka topline. Primijenjeni model prikladan je za ispitivanje procesa u usisnom i ispušnom kolektoru, ali ne uzima u obzir utjecaj vrtloženja na kvalitetu izgaranja. Rezultati istraživanja koncepta na razini su Atkinsonova i Millerova ciklusa koji su ušli u serijsku primjenu. Daljnje ispitivanje koncepta kod atmosferskih motora u tom pogledu nema perspektivu, dok je područje prednabijanih motora i dalje aktualno. Istraživanje je pridonijelo razumijevanju kompleksnosti CFD modela

i jednim dijelom utjecalo na usmjeravanje daljnjeg istraživanja prema nužnosti razvoja jednostavnijih emisijskih modela MSUI-ja unutar modela hibridnih vozila.

Iz detaljne analize svih komercijalno dostupnih sustava za kontrolu emisija proizašli su zaključci koji su usmjerili istraživanje prema problemima ponašanja sustava kontrole emisija u eksploataciji i u stvarnim uvjetima upotrebe te u smjeru modeliranja emisija hibridnih vozila. Literatura iz ovog područja uglavnom obrađuje utjecajne faktore na pojedinačne podsustave iz čega proizlazi zaključak o potrebi istraživanja sustavnijim pristupom. Takav pristup podrazumijeva kompletan sustav regulacije emisija, odnosno istodobno promatranje svih primijenjenih podsustava zbog njihova jakog međusobnog utjecaja. Dane su smjernice s procjenom kvalitete funkcionalnosti pojedinih tehnika kao i mogući načini postizanja određenih emisijskih propisa. Napravljena je kvalitativna usporedba koncepata mogućih kombinacija pojedinačnih sustava s aspekta učinka na najutjecajnije emisije, potrošnju goriva, održavanje, veličinu i cijenu izvedbe.

Opširan pregled literature iz područja sustava za kontrolu emisija usmjerio je istraživanje na nekoliko područja koja su najveći izazovi za vozila pogonjena MSUI-jem. Iako je problematika emisija u stvarnim uvjetima upotrebe široko istražena nakon „Diesel gate“ afere, ispitivanja u stvarnim uvjetima nakon dužeg perioda eksploatacije su vrlo rijetka i obično se odnose na uska područja određenog sustava za kontrolu emisija. Provedeno ispitivanje na vozilima pokretanim dizelskim motorima s ispravnim sustavima za kontrolu emisija potvrđuje poznatu problematiku značajnog odstupanja emisija u stvarnim uvjetima upotrebe vozila u odnosu na zakonom propisane granične vrijednosti. Iznimka su samo emisije ugljikovog monoksida koje su daleko ispod graničnih vrijednosti. Unatoč tome što su u svrhu ispitivanja korištena ispravna rabljena vozila, s dugim periodom eksploatacije, rezultati mjerenja slični su očekivanim rezultatima za nova vozila. Može se zaključiti da promatrani sustavi za kontrolu emisija nisu podložni znatnijoj degradaciji pri čemu je najčešće dovoljno osigurati kvalitetnu kontrolu prisutnosti ili njihova potpunog zakazivanja.

Rezultati istraživanja na vozilima s neispravnim komponentama za kontrolu emisija pokazuju da emisije ispušnih plinova tih vozila višestruko premašuju granične vrijednosti, s tim da kvarovi sustava imaju znatno veće posljedice na vozilima s višim emisijskim propisima. I u ovom slučaju su iznimka CO emisije koje su, unatoč povećanju od gotovo deset puta u odnosu na vozila s ispravnim oksidacijskim katalizatorima, još uvijek ispod graničnih vrijednosti. Iz navedenog se može zaključiti da emisije ugljikovog monoksida nisu problem kod dizelskih vozila ni u jednom scenariju.

Predložen je koncept stacionarnog ispitivanja ispravnosti DOC i EGR sustava kontrole emisija dizelskih vozila u sklopu redovnog tehničkog pregleda vozila bez ulaganja u dodatnu opremu stanica za tehnički pregled. Funkcionalnost koncepta dokazana je na ispitivanim vozilima na način da se odsutnost ili zakazivanje sustava recirkulacije ispušnih plinova dokazuje smanjenim pretičkom kisika u ispušnim plinovima. Odsutnost dizelskog oksidacijskog katalizatora dokazuje se višestrukim povećanjem emisija CO u praznom hodu uz prethodno osiguravanje njegove radne temperature. Unatoč tome što sva ispitivana vozila pokazuju isti trend, uočena je značajna razlika ponašanja između vozila tipski odobrenih prema različitim emisijskim propisima, stoga je za primjenu predloženog koncepta potrebno izraditi tipsku bazu podataka koja obuhvaća sve karakteristične tipove vozila.

Na temelju zabilježenih podataka o emisijama, potrošnji goriva i pogonskoj energiji kreiran je novi emisijski model hibridnog električnog vozila. Jedan od najutjecajnijih uzroka slabe korelacije modalnih modela hibridnih vozila iz literature, odnosno nemogućnost primjene bilo kakve strategije upravljanja energijom između različitih izvora, riješen je implementacijom predloženog toka energije HEV-a. Dodavanjem dijagrama toka energije, koji uključuje unutarnje varijable, predstavljeni model se kao i korigirani modeli iz literature građom odmiče od klasične definicije VSP modela koji ovise isključivo o vanjskim varijablama, ali i dalje zadržava prednosti modalnih modela. Autori su u obrađenoj literaturi samo djelomično riješili ovaj problem primjenom osnovne logike uključivanja i isključivanja MSUI-ja, korekcijskim faktorima bez fizikalnog uporišta ili primjenom određenih dijelova emisijskih mapa MSUI-ja. Takva rješenja imaju za posljedicu značajno povećanje broja unutarnjih varijabli i vrlo složene postupke određivanja pojedinih parametara. Primijenjeni tok energije, orijentiran prema funkciji, omogućio je minimalno povećanje broja unutarnjih varijabli čime se bitno ne narušavaju osnovne prednosti modalnih modela. Definiranje modalnih emisija po jedinici pogonske energije smanjuje pogrešku rasipanja rezultata unutar jednog razreda i omogućava zapis funkcije cilja s jasnom fizikalnom interpretacijom. Predloženi model HEV-a preliminarno je testiran u identičnim uvjetima u kojima su vršena mjerenja tako da je primijenjena jednostavna strategija upravljanja energijom na temelju pravila, u svrhu minimalizacije CO₂ emisija odnosno potrošnje goriva.

Ustanovljena je osjetljivost modela na kvalitetu ulaznih podataka, posebice u području modalnih razreda manje učestalosti, gdje tromost analizatora uzrokuje usrednjavanje sa susjednim razredima. Iz navedenog proizlazi da je za kvalitetan postupak vrednovanja modela potrebno osigurati opremu s visokom dinamikom analize ispušnih plinova. Značajna prednost

predloženog modela u odnosu na kontrolni je daleko jednostavnije praćenje zadanih pravila zbog višestruko većeg broja varijabli i rada u vremenskoj domeni kontrolnog modela. Manja zabilježena odstupanja prijeđenog puta posljedica su različitih pristupa modeliranju kod uspoređenih modela, odnosno upotrebe PID regulatora kod unaprednog modela. Najveća zabilježena odstupanja CO₂ emisija i potrošnje goriva od 3,8 % zabilježena su kod HEV-a u RDE ciklusu i odstupanja od 4.4 % za klasično vozilo u WLTP ciklusu. Sve ostale kombinacije vozila i ciklusa pokazuju bolja predviđanja s oko 1 % pogreške, što pokazuje vjerodostojnost modela. Predloženi model pokazuje nešto lošije rezultate kao i veće rasipanje u predviđanju NO_x emisija, gdje su najveća odstupanja od 9,6 % zabilježena kod modela HEV-a u WLTP ciklusu. Veće odstupanje NO_x emisija je očekivano zbog značajnijeg utjecaja tranzijenata i njihove loše interpretacije kod kontrolnog modela, ali i zbog EGR-a kao osnovnog sustava kontrole NO_x emisija, čije ponašanje nije potpuno definirano trenutnom radnom točkom. Predstavljeni model pokazuje dobre rezultate i u području klasičnih vozila u kojima i konvencionalni VSP modeli pokazuju dobra svojstva. Najveću prednost razvijeni model pokazuje kod hibridnih vozila gdje klasični VSP modeli pokazuju značajne manjkavosti u pogledu točnosti predviđanja, dok korigirani modalni modeli imaju velik stupanj složenosti sa značajno većom pogreškom. Osnovna svrha usporedivih modela iz literature je isključivo predviđanje emisija modeliranog vozila u različitim uvjetima upotrebe, kopirajući strategiju izvornog vozila. Viši stupnjevi hibridizacije HEV-a smanjuju točnost predviđanja emisija i potrošnje goriva jer razlikovanje više izvora energije postaje ključan dio modela. Predloženi model ima mogućnost kopiranja ponašanja u drugačijim uvjetima kroz naučenu strategiju upravljanja energijom, na koju je moguće naknadno utjecati u svrhu optimizacije što mu omogućava upotrebu i u razvojnoj fazi. Primjena varijabli koje opisuju unutarnje tokove energije s osnovnim elementima pogona čini ga upotrebljivim i kod najviših stupnjeva hibridizacije, odnosno kod PHEV vozila. Složeni klasični fizikalni modeli zahtijevaju velike vještine i složene algoritme da bi ostvarili stvarne funkcije cilja. Također, problem klasičnih fizikalnih modela je zbog ogromnog broja varijabli i parametara vrlo složen postupak optimizacije i često zapinjanje u lokalnim minimuma bez pronalaska globalno optimalnog rješenja. U konačnici postoji i mogućnost korištenja predloženog modela kao kontrolnog mehanizma ili mehanizma procjene kvalitete primijenjene strategije kod konvencionalnih fizikalnih modela.

5.1. Smjernice za daljnja istraživanja

Tijekom a i nakon provedenih istraživanja došlo se do novih znanstvenih spoznaja koje bi trebalo istražiti u svrhu daljnjeg poboljšanja predstavljenih modela. Na razvoj modela utjecalo je znatno šire područje istraživanja od same problematike modeliranja i korištenja modalnih modela. Široko područje istraživanja je rezultiralo značajno drugačijim pristupom od do sada korištenih tehnika primijenjenih na području istraživanja.

Predstavljeni model samo u određenoj mjeri obuhvaća dinamičko ponašanje u obliku usrednjavanja rezultata, što u predstavljenim uvjetima osrednje dinamike vožnje bez znatnije promjene elevacije dobro aproksimira stvarno stanje modeliranog vozila. Model ne obuhvaća hladne startove koji u odnosu na hibridna vozila s vanjskim izvorom električne energije imaju daleko veći značaj nego kod klasičnih vozila. Nešto slabije predviđanje NO_x emisija uzrokovano je utjecajnim faktorima koji nisu obuhvaćeni trenutnom radnom točkom MSUI-ja nego prije svega i smjerom i brzinom dolaska do te radne točke. Općenito svi sustavi kontrole emisija temeljeni na katalitičkom učinku jako ovise o temperaturama unutar samih sustava na koje utječe niz događaja. Ove je utjecaje fizikalnim modelima vrlo teško opisati, a kod modalnih modela isti su potpuno zanemareni. Proširenje modela na višedimenzionalno područje, uključivanjem dodatnih varijabli, poput temperature motora donekle bi riješilo probleme predviđanja emisija kod hladnog starta. Međutim ovakav pristup nije najkvalitetnije rješenje zbog slabe korelacije s parametrima rada sustava kontrole emisija kao i gomilanja unutarnjih varijabli koje su teško predvidive izvana. U svrhu rješavanja prethodno opisanih problema predlaže se daljnje istraživanje proširenog modela s dva utjecajna modula opisana isključivo vanjskim ili postojećim unutarnjim varijablama:

- utjecaj gradijenta snage koji korigira izrazito dinamička ponašanja svih sustava čije ponašanje nije dovoljno dobro opisano trenutnom radnom točkom, a jako ovise o brzini i smjeru dostizanja te točke (EGR, omjer zraka i goriva, kut paljenja...)

- utjecaj povijesti događaja, odnosno povijesti snage, koji korigira spore, ali jako utjecajne promjene sustava kontrole emisija koji obično izraženo ovise o temperaturama (SCR, oksidacijski i redukcijski katalizatori i sl.), kao i sustave koji zahtijevaju periodične regeneracije (DPF, GPF, LNT i sl.)

Predloženi se model, kao i klasični VSP modeli, temelji na raspodjeli emisija unutar diskretnih raspona snage odnosno modalnih razreda. Broj i raspored razreda uglavnom su preuzeti iz metode procjene emisija pomoću grupiranja snage pri čemu nije izvršena analiza

njihova utjecaja na točnost rezultata predviđanja. Za razliku od metode grupiranja snage, u literaturi se u VSP analizi uglavnom koriste rasporedi razreda s konstantnim rasponima jednake širine. U svrhu optimizacije i postizanja određene točnosti potrebno je istražiti utjecaj broja, kao i raspored raspona snage na točnost predviđanja te odrediti njihove optimalne vrijednosti. Potrebno je istražiti utjecaj i svrhovitost uvođenja kontinuirane varijable na točnost predviđanja emisija i potrošnje goriva u odnosu na standardnu VSP definiciju.

LITERATURA

- [1] A. Kozina, G. Radica, and S. Nižetić, "Increasing engine efficiency at part load with the exhaust valve control: a simplified modelling approach," *International Journal of Exergy*, vol. 26, no. 1-2, pp. 131-153, 2018.
- [2] A. Kozina, G. Radica, and S. Nižetić, "Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines," *Journal of Cleaner Production*, vol. 262, p. 121105, 2020.
- [3] A. Kozina, G. Radica, and S. Nižetić, "Emission Analysis of Diesel Vehicles in Circumstances of Emission Regulation System Failure: A Case Study," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 144, no. 8, 2022.
- [4] A. Kozina, T. Vidović, G. Radica, and A. Vučetić, "A New Vehicle-Specific Power Model for the Estimation of Hybrid Vehicle Emissions," *Energies*, vol. 16, no. 24, p. 8094, 2023.
- [5] "Regulation (EU) 2023/851 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO₂ emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with the Union's increased climate ambition (Text with EEA relevance)." <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/851> (accessed May 10, 2024).
- [6] B. Mali, A. Shrestha, A. Chapagain, R. Bishwokarma, P. Kumar, and F. Gonzalez-Longatt, "Challenges in the penetration of electric vehicles in developing countries with a focus on Nepal," *Renewable Energy Focus*, vol. 40, pp. 1-12, 2022/03/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.11.003>.
- [7] T. Fleischer, "Transport and sustainability, with special regard to the EU Transport White Paper of 2011," *Institute for World Economics of the Hungarian Academy of Sciences Working Papers*, 2011.
- [8] P. Mock and S. Díaz, "Pathways to decarbonization: the European passenger car market in the years 2021–2035," *communications*, vol. 49, pp. 847129-848102, 2021.
- [9] T. Takaishi, A. Numata, R. Nakano, and K. Sakaguchi. "Approach to high efficiency diesel and gas engines." <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e451/e451021.pdf> (accessed June 19, 2024).
- [10] "Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009." <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0586> (accessed June 19, 2024).
- [11] "Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality." https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495 (accessed 19 June, 2024).
- [12] Z. C. Samaras *et al.*, "A European regulatory perspective towards a Euro 7 proposal," *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, vol. 5, no. 2022-37-0032, pp. 998-1011, 2022.
- [13] W. Zhuang *et al.*, "A survey of powertrain configuration studies on hybrid electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 262, p. 114553, 2020.

- [14] S. S. Ravi, J. Mazumder, J. Sun, C. Brace, and J. W. Turner, "Techno-Economic assessment of synthetic E-Fuels derived from atmospheric CO₂ and green hydrogen," *Energy Conversion and Management*, vol. 291, p. 117271, 2023.
- [15] A. Vučetić *et al.*, "Real Driving Emission from Vehicle Fuelled by Petrol and Liquefied Petroleum Gas (LPG)," *Cognitive Sustainability*, vol. 1, no. 4, 2022.
- [16] U. K. Medževėpytė, R. Makaras, V. Lukoševičius, and S. Kilikevičius, "Application and Efficiency of a Series-Hybrid Drive for Agricultural Use Based on a Modified Version of the World Harmonized Transient Cycle," *Energies*, vol. 16, no. 14, p. 5379, 2023.
- [17] W. Enang and C. Bannister, "Modelling and control of hybrid electric vehicles (A comprehensive review)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 1210-1239, 2017.
- [18] İ. A. Reşitoğlu, K. Altinişik, and A. Keskin, "The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 17, no. 1, pp. 15-27, 2015.
- [19] P. Lakshminarayanan, Y. V. Aghav, and Y. Shi, *Modelling diesel combustion*. Springer, 2010.
- [20] M. Perin and T. Achek, "Lean burn engines," SAE Technical Paper, 0148-7191, 2013.
- [21] A. K. Agarwal, D. Kumar, N. Sharma, and U. Sonawane, *Engine Modeling and Simulation*. Springer, 2022.
- [22] D. Kihás and M. R. Uchanski, "Engine-Out NO_x models for on-ECU implementation: A brief overview," 2015.
- [23] J. Ma, F. Xu, K. Huang, and R. Huang, "Improvement on the linear and nonlinear autoregressive model for predicting the NO_x emission of diesel engine," *Neurocomputing*, vol. 207, pp. 150-164, 2016.
- [24] A. N. Bhatt and N. Shrivastava, "Application of artificial neural network for internal combustion engines: a state of the art review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 897-919, 2022.
- [25] H. Omidvarborna, A. Kumar, and D.-S. Kim, "Recent studies on soot modeling for diesel combustion," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 635-647, 2015.
- [26] S. Daido, Y. Kodama, T. Inohara, N. Ohyama, and T. Sugiyama, "Analysis of soot accumulation inside diesel engines," *JSAE review*, vol. 21, no. 3, pp. 303-308, 2000.
- [27] J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [28] E. Jiaqiang *et al.*, "Soot formation mechanism of modern automobile engines and methods of reducing soot emissions: A review," *Fuel Processing Technology*, vol. 235, p. 107373, 2022.
- [29] Ö. L. Gülder and D. R. Snelling, "Influence of nitrogen dilution and flame temperature on soot formation in diffusion flames," *Combustion and flame*, vol. 92, no. 1-2, pp. 115-124, 1993.
- [30] D. Du, R. Axelbaum, and C. K. Law, "Soot formation in strained diffusion flames with gaseous additives," *Combustion and flame*, vol. 102, no. 1-2, pp. 11-20, 1995.
- [31] R. Zhang and S. Kook, "Influence of fuel injection timing and pressure on in-flame soot particles in an automotive-size diesel engine," *Environmental science & technology*, vol. 48, no. 14, pp. 8243-8250, 2014.
- [32] Z. Han, A. Uludogan, G. J. Hampson, and R. D. Reitz, "Mechanism of soot and NO_x emission reduction using multiple-injection in a diesel engine," *SAE transactions*, pp. 837-852, 1996.

- [33] H. Hiroyasu and T. Kadota, "Models for combustion and formation of nitric oxide and soot in direct injection diesel engines," *SAE transactions*, pp. 513-526, 1976.
- [34] J. Nagle and R. Strickland-Constable, "Oxidation of carbon between 1000–2000 C," in *Proceedings of the fifth conference on carbon*, 1962: Elsevier, pp. 154-164.
- [35] F. Tao, S. Srinivas, R. D. Reitz, and D. E. Foster, "Comparison of three soot models applied to multi-dimensional diesel combustion simulations," *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, vol. 48, no. 4, pp. 671-678, 2005.
- [36] F. Perini, E. Mattarelli, and F. Paltrinieri, "Development and validation of predictive emissions schemes for quasi-dimensional combustion models," SAE Technical paper, 0148-7191, 2010.
- [37] A. Onorati, G. Ferrari, and G. D'Errico, "1D unsteady flows with chemical reactions in the exhaust duct-system of SI engines: predictions and experiments," *SAE Transactions*, pp. 738-752, 2001.
- [38] H. Shen, T. Shamim, and S. Sengupta, "An investigation of catalytic converter performances during cold starts," SAE Technical Paper, 0148-7191, 1999.
- [39] S. Chan and D. Hoang, "Modeling of catalytic conversion of CO/HC in gasoline exhaust at engine cold-start," SAE Technical Paper, 0148-7191, 1999.
- [40] G. D'Errico, G. Ferrari, A. Onorati, and T. Cerri, "Modeling the pollutant emissions from a SI engine," *SAE Transactions*, pp. 1-11, 2002.
- [41] H. S. Sorathia, P. P. Rahhod, and A. S. Sorathiya, "Effect of Exhaust gas recirculation (EGR) on NOx emission from CI engine. A review study," *Int J Adv Eng Res Studies*, vol. 3, pp. 223-227, 2012.
- [42] K. Mollenhauer, H. Tschöke, and K. G. Johnson, *Handbook of diesel engines*. Springer Berlin, 2010.
- [43] P. R. Ghodke and J. G. Suryavanshi, "Review of Advanced EGR and Breathing Systems for High Performance and Low Emission HSDI Diesel Engine," *Int. J. Mod. Eng. Res.*, vol. 2, no. 5, pp. 3138-3142, 2012.
- [44] Y. Park and C. Bae, "Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine," *Applied Energy*, vol. 133, pp. 308-316, 2014.
- [45] S. Reifarth, "EGR-systems for diesel engines," 2010.
- [46] B. Pereda-Ayo and J. R. González-Velasco, "NOx storage and reduction for diesel engine exhaust aftertreatment," *Diesel Engine-Combustion, Emissions and Condition Monitoring*, 2013.
- [47] C. D. DiGiulio *et al.*, "NH3 formation over a lean NOx trap (LNT) system: Effects of lean/rich cycle timing and temperature," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 147, pp. 698-710, 2014.
- [48] T. Maunula, "Combination of LNT and SCR for NOx reduction in passenger car applications," *Combustion Engines*, vol. 53, 2014.
- [49] H. Sinzenich and K. Wehler, "Selective Catalytic Reduction: Exhaust aftertreatment for reducing nitrogen oxide emissions," *MTU Friedrichshafen GmbH*, 2014.
- [50] M. Nesbit *et al.*, "The Differences between the EU and US Legislation on Emissions in the Automotive Sector," 2016.
- [51] B. Amon and G. Keefe, "On-Road Demonstration of NOx Emission Control for Heavy-Duty Diesel Trucks using SINOx™ Urea SCR technology-Long-term Experience and Measurement Results," SAE Technical Paper, 0148-7191, 2001.
- [52] L. Lietti, I. Nova, and P. Forzatti, "Role of ammonia in the reduction by hydrogen of NOx stored over Pt–Ba/Al2O3 lean NOx trap catalysts," *Journal of catalysis*, vol. 257, no. 2, pp. 270-282, 2008.

- [53] J. H. Kwak, R. G. Tonkyn, D. H. Kim, J. Szanyi, and C. H. Peden, "Excellent activity and selectivity of Cu-SSZ-13 in the selective catalytic reduction of NO_x with NH₃," *Journal of Catalysis*, vol. 275, no. 2, pp. 187-190, 2010.
- [54] M. Koebel, M. Elsener, and M. Kleemann, "Urea-SCR: a promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines," *Catalysis today*, vol. 59, no. 3-4, pp. 335-345, 2000.
- [55] B. T. Johnson, "Diesel engine emissions and their control," *Platinum Metals Review*, vol. 52, no. 1, pp. 23-37, 2008.
- [56] A.-M. Stamatellou and A. Stamatelos, "Overview of Diesel particulate filter systems sizing approaches," *Applied Thermal Engineering*, vol. 121, pp. 537-546, 2017.
- [57] Y. Quan-shun, T. Jian-wei, G. Yun-Shan, H. Li-jun, and P. Zi-hang, "Application of diesel particulate filter on in-use on-road vehicles," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1730-1736, 2017.
- [58] B. Guan, R. Zhan, H. Lin, and Z. Huang, "Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines," *Journal of environmental management*, vol. 154, pp. 225-258, 2015.
- [59] O. M. Govardhan, "Fundamentals and classification of hybrid electric vehicles," *International Journal of Engineering and Techniques*, vol. 3, no. 5, pp. 194-198, 2017.
- [60] W. Liu, *Introduction to hybrid vehicle system modeling and control*. John Wiley & Sons, 2013.
- [61] D. S. Cardoso, P. O. Fael, and A. Espírito-Santo, "A review of micro and mild hybrid systems," *Energy reports*, vol. 6, pp. 385-390, 2020.
- [62] F. Zhang, L. Wang, S. Coskun, H. Pang, Y. Cui, and J. Xi, "Energy management strategies for hybrid electric vehicles: Review, classification, comparison, and outlook," *Energies*, vol. 13, no. 13, p. 3352, 2020.
- [63] S. Onori, L. Serrao, and G. Rizzoni, *Hybrid electric vehicles: Energy management strategies*. Springer, 2016.
- [64] K. Ç. Bayindir, M. A. Gözükcüçük, and A. Teke, "A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units," *Energy conversion and Management*, vol. 52, no. 2, pp. 1305-1313, 2011.
- [65] K. V. Singh, H. O. Bansal, and D. Singh, "A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components," *Journal of Modern Transportation*, vol. 27, no. 2, pp. 77-107, 2019.
- [66] L. Wang, Y. Cui, F. Zhang, and G. Li, "Architectures of planetary hybrid powertrain system: review, classification and comparison," *Energies*, vol. 13, no. 2, p. 329, 2020.
- [67] J. Meisel, W. Shabbir, and S. A. Evangelou, "Evaluation of the through-the-road architecture for plug-in hybrid electric vehicle powertrains," in *2013 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, 2013: IEEE, pp. 1-5.
- [68] S. Zulkifli, S. Mohd, N. Saad, and A. Aziz, "Split-parallel through-the-road hybrid electric vehicle: Operation, power flow and control modes," in *2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2015: IEEE, pp. 1-7.
- [69] C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247-275, 2002.
- [70] M. Maździel, "Vehicle emission models and traffic simulators: a review," *Energies*, vol. 16, no. 9, p. 3941, 2023.
- [71] B. Othman, G. De Nunzio, D. Di Domenico, and C. Canudas-de-Wit, "Ecological traffic management: A review of the modeling and control strategies for improving environmental sustainability of road transportation," *Annual Reviews in Control*, vol. 48, pp. 292-311, 2019.

- [72] K. Ahn, H. Rakha, A. Trani, and M. Van Aerde, "Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels," *Journal of transportation engineering*, vol. 128, no. 2, pp. 182-190, 2002.
- [73] H. Eichlstederr, S. Hausberger, M. Rexeis, M. Zallinger, and R. Luz, "Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3," 2009.
- [74] G. Scora and M. Barth, "Comprehensive modal emissions model (cmem), version 3.01," *User guide. Centre for environmental research and technology. University of California, Riverside*, vol. 1070, p. 1580, 2006.
- [75] B. Degraeuwe and M. Weiss, "Does the New European Driving Cycle (NEDC) really fail to capture the NOX emissions of diesel cars in Europe?," *Environmental Pollution*, vol. 222, pp. 234-241, 2017.
- [76] L. I. Panis, S. Broekx, and R. Liu, "Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits," *Science of the total environment*, vol. 371, no. 1-3, pp. 270-285, 2006.
- [77] C. C. Chan, A. Bouscayrol, and K. Chen, "Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 59, no. 2, pp. 589-598, 2009.
- [78] K. B. Wipke, M. R. Cuddy, and S. D. Burch, "ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 48, no. 6, pp. 1751-1761, 1999.
- [79] J. Liu and H. Peng, "Modeling and control of a power-split hybrid vehicle," *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 16, no. 6, pp. 1242-1251, 2008.
- [80] S. Bogosyan, M. Gokasan, and D. J. Goering, "A novel model validation and estimation approach for hybrid serial electric vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 4, pp. 1485-1497, 2007.
- [81] F. Chiara, J. Wang, C. B. Patil, M.-F. Hsieh, and F. Yan, "Development and experimental validation of a control-oriented Diesel engine model for fuel consumption and brake torque predictions," *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 261-277, 2011.
- [82] L. Pelkmans, P. Debal, T. Hood, G. Hauser, and M.-R. Delgado, "Development of a simulation tool to calculate fuel consumption and emissions of vehicles operating in dynamic conditions," SAE Technical Paper, 0148-7191, 2004.
- [83] M. Zhou and H. Jin, "Development of a transient fuel consumption model," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 51, pp. 82-93, 2017.
- [84] M. Lindgren, "A transient fuel consumption model for non-road mobile machinery," *Biosystems Engineering*, vol. 91, no. 2, pp. 139-147, 2005.
- [85] W. Lei, H. Chen, and L. Lu, "Microscopic emission and fuel consumption modeling for light-duty vehicles using portable emission measurement system data," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 66, pp. 918-925, 2010.
- [86] M. Pettiti, L. Pilo, and F. Millo, "Development of a new mean value model for the analysis of turbolag phenomena in automotive diesel engines," *SAE Transactions*, pp. 822-833, 2007.
- [87] M. Barth *et al.*, "The development of a comprehensive modal emissions model," *NCHRP Web-only document*, vol. 122, pp. 25-11, 2000.
- [88] M. V. E. Simulator, "User guide," ANSYS Inc. URL <http://www.ansys.com>, 2009.
- [89] D. W. Gao, C. Mi, and A. Emadi, "Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 729-745, 2007.
- [90] T. Markel *et al.*, "ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling," *Journal of power sources*, vol. 110, no. 2, pp. 255-266, 2002.

- [91] G. Liao, T. Weber, and D. Pfaff, "Modelling and analysis of powertrain hybridization on all-wheel-drive sport utility vehicles," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 218, no. 10, pp. 1125-1134, 2004.
- [92] H. T. Arat, B. Tanc, N. Yonet, and E. Baltacioglu, "Comparative Simulation Analyses on Eenergy flow chatacteristic of different HEV configurations," *16th International Conference on Clean Energy (ICCE-2018), 9-11 May 2018, Famagusta, N. Cyprus*.
- [93] K. Chen, A. Bouscayrol, A. Berthon, P. Delarue, D. Hissel, and R. Trigui, "Global modeling of different vehicles," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 80-89, 2009.
- [94] A. Shukla, "Modelling and simulation of hybrid electric vehicles," Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, 2012.
- [95] X. Li and S. S. Williamson, "Efficiency and suitability analyses of varied drive train architectures for plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) applications," in *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008: IEEE, pp. 1-6.
- [96] B. Wahono, W. B. Santoso, and A. Nur, "Analysis of range extender electric vehicle performance using vehicle simulator," *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 409-418, 2015.
- [97] I. Mahalec, Z. Lulić, and D. Kozarac, "Motori s unutarnjim izgaranjem," *Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb*, 2010.
- [98] A. Kozina, "Procjena emisija, modeliranje i upravljanje sustavima pogona hibridnih električnih vozila," *Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, Kvalifikacijski doktorski ispit 2022*.
- [99] D.-D. Tran, M. Vafaeipour, M. El Baghdadi, R. Barrero, J. Van Mierlo, and O. Hegazy, "Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109596, 2020.
- [100] M. Sabri, K. A. Danapalasingam, and M. F. Rahmat, "A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 1433-1442, 2016.
- [101] F. R. Salmasi, "Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends," *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 56, no. 5, pp. 2393-2404, 2007.
- [102] P. Zhang, F. Yan, and C. Du, "A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 88-104, 2015.
- [103] A. M. Ali and D. Söffker, "Towards optimal power management of hybrid electric vehicles in real-time: A review on methods, challenges, and state-of-the-art solutions," *Energies*, vol. 11, no. 3, p. 476, 2018.
- [104] J. L. Jimenez-Palacios, "Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing," *Massachusetts Institute of Technology*, 1998.
- [105] H. Watson, E. Milkens, M. Preston, C. Chittleborough, and B. Alimoradian, "Predicting fuel consumption and emissions - transferring chassis dynamometer results to real driving conditions," *SAE Transactions*, pp. 188-211, 1983.
- [106] D. Bowyer, R. Akçelik, and D. Biggs, "Guide to fuel consumption analyses for urban traffic management," 1984: Australian Road Research Board.
- [107] G. Song and L. Yu, "Characteristics of low-speed vehicle-specific power distributions on urban restricted-access roadways in Beijing," *Transportation research record*, vol. 2233, no. 1, pp. 90-98, 2011.

- [108] H. Zhai, H. C. Frey, N. M. Roupail, G. A. Goncalves, and T. L. Farias, "Comparison of flexible fuel vehicle and life-cycle fuel consumption and emissions of selected pollutants and greenhouse gases for ethanol 85 versus gasoline," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 59, no. 8, pp. 912-924, 2009.
- [109] H. C. Frey, N. M. Roupail, H. Zhai, T. L. Farias, and G. A. Gonçalves, "Comparing real world fuel consumption for diesel and hydrogen fueled transit buses and implication for emissions," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 12, no. 4, pp. 281-291, 2007.
- [110] Q. Yu, T. Li, and H. Li, "Improving urban bus emission and fuel consumption modeling by incorporating passenger load factor for real world driving," *Applied Energy*, vol. 161, pp. 101-111, 2016.
- [111] H. Wang, L. Fu, Y. Zhou, and H. Li, "Modelling of the fuel consumption for passenger cars regarding driving characteristics," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 13, no. 7, pp. 479-482, 2008.
- [112] X. Zhou, J. Huang, W. Lv, and D. Li, "Fuel consumption estimates based on driving pattern recognition," in *2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing*, 2013: IEEE, pp. 496-503.
- [113] M. Campino, N. Henriques, and G. Duarte, "Energy Assessment of a Plug-in Hybrid Vehicle Propulsion Management System," *KnE Engineering*, pp. 833-845, 2020.
- [114] G. Duarte, R. A. Varella, G. Gonçalves, and T. Farias, "Effect of battery state of charge on fuel use and pollutant emissions of a full hybrid electric light duty vehicle," *Journal of Power Sources*, vol. 246, pp. 377-386, 2014.
- [115] W. Wang *et al.*, "A new vehicle specific power method based on internally observable variables: Application to CO2 emission assessment for a hybrid electric vehicle," *Energy Conversion and Management*, vol. 286, p. 117050, 2023.
- [116] G. O. Duarte, G. A. Gonçalves, P. C. Baptista, and T. L. Farias, "Establishing bonds between vehicle certification data and real-world vehicle fuel consumption—a vehicle specific power approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 92, pp. 251-265, 2015.
- [117] Z. Mera, R. Varella, P. Baptista, G. Duarte, and F. Rosero, "Including engine data for energy and pollutants assessment into the vehicle specific power methodology," *Applied Energy*, vol. 311, p. 118690, 2022.
- [118] H. Zhai, H. C. Frey, and N. M. Roupail, "Development of a modal emissions model for a hybrid electric vehicle," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 16, no. 6, pp. 444-450, 2011.
- [119] X. Zeng, Q. Qian, H. Chen, D. Song, and G. Li, "A unified quantitative analysis of fuel economy for hybrid electric vehicles based on energy flow," *Journal of cleaner production*, vol. 292, p. 126040, 2021.
- [120] T. Kutrašnik, "Analytical framework for analyzing the energy conversion efficiency of different hybrid electric vehicle topologies," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 8, pp. 1924-1938, 2009.
- [121] A. Kozina, G. Radica, and S. Nižetić, "Hybrid Vehicles Emissions Assessment," in *2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 2021: IEEE, pp. 1-5.
- [122] J. Anderson, "Expectations for actual Euro 6 vehicle emissions," ed: Concawe-Ricardo, 2018.
- [123] J. Demuyneck, D. Bosteels, M. De Paepe, C. Favre, J. May, and S. Verhelst, "Recommendations for the new WLTP cycle based on an analysis of vehicle emission measurements on NEDC and CADC," *Energy Policy*, vol. 49, pp. 234-242, 2012.

- [124] N. Hooftman, M. Messagie, J. Van Mierlo, and T. Coosemans, "A review of the European passenger car regulations–Real driving emissions vs local air quality," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 86, pp. 1-21, 2018.
- [125] S. Kwon, Y. Park, J. Park, J. Kim, K.-H. Choi, and J.-S. Cha, "Characteristics of on-road NOx emissions from Euro 6 light-duty diesel vehicles using a portable emissions measurement system," *Science of the Total Environment*, vol. 576, pp. 70-77, 2017.
- [126] R. O'Driscoll, M. E. Stettler, N. Molden, T. Oxley, and H. M. ApSimon, "Real world CO2 and NOx emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars," *Science of the total environment*, vol. 621, pp. 282-290, 2018.
- [127] (2016). *COMMISSION REGULATION (EU) 2016/427; amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6)*.
- [128] R. A. Varella, G. Duarte, P. Baptista, L. Sousa, and P. M. Villafuerte, "Comparison of data analysis methods for European real driving emissions regulation," SAE Technical Paper, 0148-7191, 2017.
- [129] I. Preda, D. Covaciu, and G. Ciolan, "Coast down test–theoretical and experimental approach," presented at the CONAT 2010 - International Automotive Congress, 2010. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/123456789/7>.
- [130] A. Kozina, T. Vidović, G. Radica, and S. Nižetić, "Emission and efficiency estimation of hybrid powertrains with continuous Vehicle Specific Power analysis," in *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 2022: IEEE, pp. 1-5.

PRILOG A

Naslov rada: Increasing engine efficiency at part load with the exhaust valve control: a simplified modelling approach

Autori: Ante Kozina, Gojmir Radica, Sandro Nižetić

Izvornik: *International Journal of Exergy*

Broj izdanja, stranice, godina: Vol. 26 No. 1/2, pp. 131 – 153, 2018

Vrsta rada: izvorni znanstveni

Izvorni jezik: engleski

Ključne riječi: engine efficiency; exhaust valve control; cylinder gas exchange; gasoline engine.

Sažetak: In this study, a new, innovative system based on variable regulation of the exhaust valves in the spark ignited engine was described and analysed. The efficiency of standard spark ignited engines decreases during partial load compared to full load, due to increased losses in the exchange of working medium, precisely, loss of suction. The simplified model of the new system has been developed and a comparison was made between the standard engine, regulated with a valve on the intake system, and an engine that is regulated by dual opening of the exhaust valves. Research was carried out on the model of a four cylinder Otto engine with direct injection into the cylinder. The main results showed a significant improvement over the standard engine with a fixed intake geometry. Specific consumption is reduced between 3.83% and 4.23%, and losses of cylinder gases exchange have decreased between 85% and 87%.

Bibliografske baze podataka: Current Contents Connect (CCC), Web of Science Core Collection, Science Citation Index Expanded (SCI-EXP), SCI-EXP, SSCI i/ili A&HCI Scopus

Impact factor: 1.25 (2018)

Mrežna adresa: <https://www.inderscience.com/offers.php?id=92510>

DOI: 10.1504/IJEX.2018.092510

PRILOG B

Naslov rada: Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines

Autori: Ante Kozina, Gojmir Radica, Sandro Nižetić

Izvornik: *Journal of cleaner production*

Broj izdanja, stranice, godina: Vol. 262, p. 121105, 2020

Vrsta rada: pregledni znanstveni

Izvorni jezik: engleski

Ključne riječi: diesel engines; emissions; nitrogen oxides; soot particles; catalysts

Sažetak: Internal combustion engines will be the main power for the vessels, heavy duty vehicles and thermoelectric plants in the future as it is nowadays. Finding the way to reduce environmental impact and to produce cleaner energy is the main task of engine manufacturers. In this paper, different methods and systems of diesel emission control are analyzed, especially exhaust gas recirculation (EGR) techniques that regulate emissions during their formation as well as exhaust after treatment techniques which reduce already generated harmful emissions based on the catalytic effect of precious metals, various catalytic converters and particle filtering (DPF). The problems of divergence with existing emission norms and ways of fulfilling them are also explained. The mechanism of exhaust gas formation and their connection with engine parameters were thoroughly analyzed. Problems that occurred when using individual methods for reducing emissions in specific working conditions of engines were explained. The impact of emission control systems on engine performance parameters such as fuel consumption, CO₂ emissions, load reaction and durability were explored. The experiments were performed based on failed studies of important parts within an emission control system. It was shown that only a systematic approach of solving diesel exhaust emissions with the use of advanced technologies will retain their importance and enable truly cleaner engines which will not only satisfy but well below the allowed emission norms.

Bibliografske baze podataka: Current Contents Connect (CCC), Web of Science Core Collection (WoSCC), Science Citation Index Expanded (SCI-EXP), SCI-EXP, SSCI

Impact factor: 9.297 (2020)

Mrežna adresa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121105>

DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121105

PRILOG C

Naslov rada: Emission Analysis of Diesel Vehicles in Circumstances of Emission Regulation System Failure: A Case Study

Autori: Ante Kozina, Gojmir Radica, Sandro Nižetić

Izvornik: *Journal of energy resources technology*

Broj izdanja, stranice, godina: vol. 144, no. 8, 2022

Vrsta rada: izvorni znanstveni

Izvorni jezik: engleski

Ključne riječi: emissions; diesel vehicle ; case study; hybrid electric vehicles, emission models

Sažetak: Despite the development of other propulsion systems, the internal combustion engines will continue to be an essential element of vehicle propulsion on the road, as the sole source of propulsion or in the hybrid drives. The main challenge for the regulatory bodies is to find suitable strategies to ensure the lowest possible impact on the environment, for new and in use vehicles. This research gives an insight into the issue related to the disproportion of exhaust emissions of diesel-powered vehicles under the conditions of real, in use, vehicle operation with respect to the approved values. Emissions measurements were performed on 6 different passenger vehicles homologated according to Euro emission standards, with correct and faulty emission control systems. The results obtained show significant increases in defective vehicle's NO_x emissions from 58.2% for Euro 5 vehicles to 78.2% for Euro 4 vehicles and increases of 86% and 227% respectively, compared to the approved values with Conformity Factor 2.1, CO emissions are increased in the fault case from 197% for Euro3 to 780% for Euro 5. A guideline is given for the emission control system with respect to its accuracy. The brief analysis of the hybrid powertrain was also elaborated as a future replacement for conventional ICE units, contributing greatly to a cleaner environment. The proposed novel hybrid energy management strategy which included only regenerative braking, has given a promising result; NO_x emissions are reduced by 45%, consumption and CO₂ emissions by 44% and CO emissions by 31%.

Bibliografske baze podataka: Current Contents Connect (CCC), Web of Science Core Collection (WoSCC), Science Citation Index Expanded (SCI-EXP), SCI-EXP, SSCI

Impact factor: 3 (2022)

Mrežna adresa: <https://doi.org/10.1115/1.4053070>

DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121105

PRILOG D

Naslov rada: A New Vehicle-Specific Power Model for the Estimation of Hybrid Vehicle Emissions

Autori: Ante Kozina, Tino Vidović, Gojmir Radica, Ante Vučetić

Izvornik: *Energies*

Broj izdanja, stranice, godina: vol. 16, no. 24, p. 8094, 2023.

Vrsta rada: izvorni znanstveni

Izvorni jezik: engleski

Ključne riječi: hybrid electric vehicles; vehicles models; VSP analyses

Sažetak: Hybrid electric vehicles are certainly one of the key solutions for improving fuel efficiency and reducing emissions, especially in terms of special vehicles and with the use of CO₂-neutral fuels. Determining the energy management strategy and finding the optimal solution with regard to the aforementioned goals remains one of the main challenges in the design of HEVs. This paper presents a new vehicle modeling method, with an emphasis on HEVs, which is based on the frequency analysis of emissions and consumption according to the current specific traction power of the vehicle. An evaluation of the newly introduced model in the RDE, NEDC and WLTP cycle was performed, and the results were compared with the standard verified vehicle model that was created in AVL's CruiseM R2021.2 software package. Positive traction energies have positive deviations of between 0.35% and 2.85%. The largest deviation in CO₂ emissions was recorded for the HEV model in the RDE cycle and in the non-hybrid model in the WLTP cycle and were 3.79% and 4.4%, respectively. All other combinations of cycle and vehicles had deviations of up to about 1%. As expected, the largest relative deviations were recorded for NO_x emissions and ranged from 0.13% to 9.62% for HEVs in the WLTP cycle.

Bibliografske baze podataka: Current Contents Connect (CCC), Web of Science Core Collection (WoSCC), Science Citation Index Expanded (SCI-EXP), SCI-EXP, SSCI

Impact factor: 3 (2023, JCR)

Mrežna adresa: <https://doi.org/10.1115/1.4053070>

ŽOVOTOPIS

Ante Kozina rođen je 2. travnja 1980. u Sinju. Pohađa osnovnu školu Trilj, nastavlja školovanje u Elektrotehničkoj školi u Splitu, a 1998. upisuje dodiplomski studij elektrotehnike, smjer elektronika na Veleučilištu u Splitu. U prosincu 2001. stječe naziv inženjera elektrotehnike. Sveučilišni studij strojarstva na Fakultetu elektrotehnike strojarstva i brodogradnje upisuje 2004. U siječnju 2009. stječe titulu diplomiranog inženjera strojarstva. Za uspjeh tijekom studija dobiva nagrade za najbolje studente završnih godina FESB-a za 2007. i 2008. te pohvalnicu za izvrstan uspjeh. Nakon završetka studija nepune tri godine radi kao voditelj gradilišta strojarske grupe poslova na nekoliko velikih građevinskih projekata. U tvrtki Tromont zapošljava se 2012. kao projektant strojarskih konstrukcija, gdje ubrzo postaje voditelj odjela projektiranja, konstrukcije i tehnologije. Poslijediplomski studij strojarstva na FESB-u upisuje 2014. godine pod mentorstvom prof. dr. sc. Gojmira Radice. Objavljuje ukupno deset znanstvenih radova iz područja procjene emisija ispušnih plinova, sudjeluje na međunarodnim konferencijama. U tvrtki Espera zapošljava se 2017. gdje radi kao voditelj strojarske grupe poslova, voditelj projekta i konstruktor. Od 2020. je zaposlen u vlastitoj tvrtki Mechtron, gdje radi na razvoju sustava vojne opreme u suradnji s više europskih i svjetskih tvrtki.

BIOGRAPHY

Ante Kozina, born on April 2, 1980, in Sinj, attended elementary school in Trilj and pursued his studies at the School of Electrical Engineering in Split. In 1998, he enrolled in an undergraduate course in electrical engineering, specializing in electronics, at the University of Split, where he obtained the title of electrical engineer in December 2001. Continuing his academic journey, Ante Kozina enrolled in the university study of mechanical engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering, and Naval architecture in 2004. In January 2009, he achieved the title of Mag. Ing. of Mechanical Engineering. His academic excellence was recognized through awards for being the best student in the years 2007 and 2008, along with a certificate of commendation for outstanding success. After completing his studies, Ante Kozina gained experience as a construction site manager on several large engineering projects for three years. In 2012, he joined the company Tromont as a design engineer, quickly progressing to become the head of the department for design, construction, and technology. Subsequently, in 2014, he pursued postgraduate studies in mechanical engineering at FESB under the mentorship of Prof. Ph.D. Gojmir Radica. During this time, he authored ten scientific papers focusing on exhaust gas emissions assessment and actively participated in international conferences. Simultaneously, Ante Kozina worked as a consulting engineer in structural engineering, production technology, and maintenance of industrial electronics. In 2017, he transitioned to Espera, where he was head of the mechanical work group, project manager, and constructor. In 2020, he founded Mechtron, a company dedicated to developing military equipment systems in collaboration with various European and international companies.