UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Dragan Z. Vašalić

MODELI ZA PODRŠKU IZBORU VOZILA I NADGRADNJI ZA TRANSPORT PRIRODNOG GASA U KOMPRIMOVANOM STANJU

Doktorska disertacija

Beograd, 2026

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Dragan Z. Vašalić

MODELS FOR SUPPORTING THE SELECTION OF VEHICLES AND BODIES FOR COMPRESSED NATURAL GAS TRANSPORT

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026

Mentor: Redovni profesor dr **Ivan Ivković**,
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Članovi komisije: Redovni profesor **dr Dragan Sekulić**,

Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Redovni profesor **dr Branko Milovanović**,

Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Redovni profesor **dr Snežana Kaplanović**,

Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Viši naučni saradnik **dr Dejan Miličević**,

Univerzitet u Beogradu – Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Datum odbrane:

MODELI ZA PODRŠKU IZBORU VOZILA I NADGRADNJI ZA TRANSPORT PRIRODNOG GASA U KOMPRIMOVANOM STANJU

Rezime: Doktorska disertacija pod nazivom „ Modeli za podršku izboru vozila i nadgradnji za transport prirodnog gasa u komprimovanom stanju“ ima za cilj unapređenje efikasnosti procesa drumskog transporta prirodnog gasa, kao i doprinos postupcima izbora vozila i nadgradnji namenjenih za skladištenje i transport prirodnog gasa, primenom naučno utemeljenih metoda iz oblasti saobraćaja i mašinstva. Istraživanje je zasnovano na specifičnostima koje prate drumski transport gasova i obuhvata razvoj tri modela za analizu parametra potrošnje goriva, izduvne emisije i njenih troškova, masenih iskorišćenja, transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta u odnosu na zahtevane količine gasa. Koncept istraživanja zasnovan je na pravcima razvoja energetskog sektora Republike Srbije, pritom uzimajući u obzir trenutni razvoj i privredne kapacitete, pre svega sa stanovišta funkcionalne primenljivost tehnologije i fleksibilnosti transporta.

Prvi model se temelji na metodama procene potrošnje goriva, zasnovanim na pogonskim karakteristikama motora, kod skupova vozila namenjenih za transport komprimovanog prirodnog gasa koji za pogon koriste prirodni gas i dizel gorivo. Svrha integracije metoda zasnovanih na pogonskim karakteristikama motora je što realnija analiza parametara koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika pogonskih agregata razmatranih vozila sa otporima koji se javljaju pri kretanju na različitim deonicama trase. Model kao takav predstavlja sveobuhvatan pristup ka proceni potrošnje goriva, uzimajući u obzir širok spektar ulaznih parametara koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, transportnih, putnih, klimatskih, saobraćajnih i specifičnih uslova eksploatacije. Koncept modela zasnovan je na utvrđivanju potrošnje goriva na osnovu procenjene eksploatacione brzine kretanja na trasi, odnosno njenim deonicama. Drugim rečima, postavka modela zasnovana je na ravnomernom kretanju, dok se promena režima kretanja aproksimira određivanjem eksploatacione brzine vozila na svakoj deonici trase. Na ovaj način se složen proces kretanja vozila pojednostavljuje i sagledava kroz režim ravnomernog kretanja vozila. S druge strane, da bi se obuhvatili uticaji ostalih režima kretanja na promenu potrošnje goriva, model uvodi korektivne faktore kojima se opisuju uticaji saobraćajnih i specifičnih uslova eksploatacije, poput međusobnih uticaja vozila u saobraćajnom toku, ponašanja vozača i dr. Funkcionalna zavisnost između potrošnje goriva, izražene u kilogramima sagorelog goriva po kilometru pređenog puta, i eksploatacione brzine vozila utvrđuje se regresionom analizom. Pored prethodno navedenih parametara koji potiču od uslova eksploatacije, modelom je otvorena mogućnost analize potrošnje goriva prema vrsti pogonskog goriva i tipu nadgradnje, odnosno prema transportovanim količinama gasa. Validacija modela izvršena je sa dve metode, metodom određivanja potrošnje goriva zasnovanoj na primeni prenosnog dijagnostičkog uređaja i metodom očitavanja količine goriva u rezervoaru tokom punjenja na stanici za snabdevanje. Prilikom razmatranja izbora metoda, uzeti su u obzir ciljevi istraživanja, raspoloživi vozni resursi, dostupnost merne opreme, zahtevana tačnost, vreme sprovođenja istraživanja, konstrukcione karakteristike vozila i nadgradnji, i posebno transportni uslovi, gde mesto utovara robe ujedno i stanica za snabdevanje gorivom. Svrha razvoja modela je utvrđivanje efekata primene različitih vrsta pogonski goriva i tipova nadgradnji. Modelom dobijeni podaci o potrošnji goriva, u odnosu na transportovane količine gasa i masena iskorišćenja, mogu doprineti postupcima donošenja odluka prilikom izboru novih vozila i nadgradnji ili konverziji postojećih.

Postavka drugog modela omogućuje procenu izduvne emisije i njenih troškova na osnovu podataka o potrošnji goriva dobijenih primenom metoda zasnovanih na pogonskim karakteristikama motora, kao u slučaju prvog modela, ili primenom podataka utvrđenih putnim merenjima. Kvantifikacija negativnih uticaja izduvne emisije vučnih vozila, na zdravlje ljudi i životnu sredinu, sprovodi se utvrđivanjem faktora emisije zagađivača i njihovih troškova. Konačne vrednosti izduvne emisije, izražene u gramima zagađivača po kilometru pređenog puta, moguće je prikazati u odlasku i povratku na svakoj deonici trase ili kao ukupne vrednosti na celoj dužini trase. Verifikacija dobijenih rezultata, izvršena je poređenjem sa rezultatima izduvne emisije iz prethodnih istraživanja, utvrđenih putnim merenjima pomoću prenosnih uređaja–analizatora. Osnovna svrha razvoja modela je utvrđivanje direktnih efekata primene različitih pogonskih goriva i materijala za izradu nadgradnji, generacijskih unapređenja tehničkih karakteristika posuda pod pritiskom, na zdravlje ljudi i životnu sredinu. Rezultati modela prvenstveno doprinose postupcima donošenja odluka pri zboru vozila i nadgradnji sa stanovišta izduvne emisije i njenih troškova.

Treći razvijeni model temelji se na jednačinama stanja realnog gasa i faktoru kompresibilnosti, na osnovu kojih se vrši procena transportovanih količina gasa po vozilu–nadgradnji, masenih iskorišćenja i potrebnih zapreminskih kapaciteta u zavisnosti od raspoloživih voznih kapaciteta i zahtevanih količina gasa. Drugim rečima, u zavisnosti od raspoloživih voznih i zapreminskih kapaciteta (broj skupova vozila, tipova nadgradnji–generacijskih unapređenja tehničkih karakteristika posuda pod pritiskom, fizičko–hemijskih svojstava gasa i faktora kompresibilnosti) modelom je moguće odrediti količinu gasa po vozilu–nadgradnji, potrebne zapreminske kapacitete i broj vožnji za realizaciju transportnog zadatka. U svrhu realizacije određenog transportnog zadatka, tj. transporta određene količine gasa, zahteva se pažljiva analiza različitih faktora, pre svega kako bi se osigurala bezbednost transporta i usklađenost sa propisima ali i ujedno obezbedila odgovarajuća efikasnost transporta. Modelom se analiziraju uticaji koji potiču od transportnih, klimatskih i eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji sa fizičko–hemijskim svojstvima gasa koji se transportuje. Validacija modela izvršena je na mestu utovara robe, poređenjem modelom određenih vrednosti sa komprimovanim količinama gasa po vozilu–nadgradnji. Svrha istraživanja jeste razvoj modela koji će omogućiti unapređenje efikasnosti procesa drumskog transporta prirodnog gasa, pružanjem podataka koji su značajni u postupcima donošenja odluka o izboru novih vozila i nadgradnji ali i organizaciji postojećih voznih kapaciteta, čime se obezbeđuje efikasniji i ekološki prihvatljiviji transport gasa.

Ključne reči: Teretna vozila, drumski transport prirodnog gasa, komprimovani prirodni gas, kompozitne posude pod pritiskom, čelične posude pod pritiskom, potrošnja goriva, izduvna emisija, troškovi izduvne emisije, masena iskorišćenja vozila, faktor kompresibilnosti

Naučna oblast: Saobraćajno inženjerstvo

Uža naučna oblast: Drumska vozila i dinamika vozila

UDK broj:

MODELS FOR SUPPORTING THE SELECTION OF VEHICLES AND BODIES FOR COMPRESSED NATURAL GAS TRANSPORT

Abstract: The doctoral dissertation entitled „Models for supporting the selection of vehicles and bodies for compressed natural gas transportation“ aims to improve the efficiency of the road transport process of natural gas, as well as to contribute to the procedures for selecting of vehicles and bodies intended intended for the storage and transportation of natural gas, through the application of scientifically grounded methods from the fields of traffic engineering and mechanical engineering. The research is based on the specific characteristics associated with road transport of gases. It includes the development of three models for the analysis of fuel consumption, exhaust emissions and their associated costs, mass utilisation, transported gas amounts, and the required volumetric capacities in relation to the specified gas amounts. The research concept is based on the development directions of the energy sector of the Republic of Serbia, while taking into account the current level of development and economic capacities, primarily from the perspective of the functional applicability of the technology and the flexibility of transport.

The first model is based on fuel consumption estimation methods derived from engine characteristics and is applied to vehicle combinations intended to transport compressed natural gas, using either natural gas or diesel fuel for propulsion. The purpose of integrating methods based on engine characteristics is to provide a more realistic analysis of the parameters arising from the operational and technical characteristics of the powertrain of the considered vehicles, in conjunction with the resistances encountered during vehicle motion along different route sections. As such, the model represents a comprehensive approach to fuel consumption estimation, accounting for a wide range of input parameters derived from the operational and technical characteristics of the vehicles and their bodies, as well as transport, road, climatic, traffic, and specific operating conditions. The model concept is based on determining fuel consumption based on the estimated operating speed of the route, or rather its sections. In other words, the model setup assumes uniform motion, while changes in driving mode are approximated by determining the vehicle's operating speeds for each section of the route. In this way, the complex process of vehicle motion is simplified and analysed under the assumption of uniform vehicle motion. On the other hand, to account for the effects of other driving modes on fuel consumption, the model introduces correction factors that describe the influence of traffic and specific operating conditions, such as vehicle interactions within the traffic flow, driver behaviour, and other relevant factors. The functional dependence between fuel consumption, expressed in kilograms of fuel burned per kilometer traveled, and the vehicle's operating speed is determined by regression analysis. In addition to the previously mentioned parameters derived from operational conditions, the model enables analysis of fuel consumption by fuel type and body type, that is, by the amount of gas transported. The model validation was performed using two methods: determining fuel consumption with a portable diagnostic device and measuring the amount of fuel in the tank during refuelling at a fuel station. When selecting the methods, the research objectives, available vehicle resources, availability of measuring equipment, required accuracy, study duration, vehicle and body design characteristics, and particularly the transport conditions were taken into account, with the loading location also being the vehicle refuelling station. The purpose of developing the model is to determine the effects of using different fuel types and body types. The fuel consumption data obtained from the model, when considered in relation to the transported gas

amounts and mass utilisation, can support decision-making when selecting new vehicles and bodies or converting existing ones.

The second model setup allows estimation of exhaust emissions and their costs based on fuel consumption data obtained using methods based on engine characteristics, as in the first model, or using data determined by road measurements. The negative impacts of exhaust emissions from towing vehicles on human health and the environment are quantified by determining pollutant–specific emission factors and their associated costs. The final exhaust emission values, expressed in grams of pollutant per kilometre travelled, can be presented separately for outbound and return trips on each route section, or as total values over the entire route length. Verification of the obtained results was carried out by comparing them with the results of exhaust emissions from previous research, determined by road measurements using portable analysers. The main purpose of developing the model is to determine the direct effects of using different fuels and materials for body construction and generational improvements in the technical characteristics of pressure vessels on human health and the environment. The model's results primarily support decision–making for vehicle assembly and body design from the perspective of exhaust emissions and their costs.

The third developed model is based on the equations of the real gas state and the compressibility factor, using which the transported gas amounts per vehicle body, mass utilisation, and required volume capacities are estimated, depending on the available transport capacities and required gas amounts. In other words, depending on the available vehicle and volumetric capacities (including the number of vehicle combinations, body types–generational improvements in the technical characteristics of pressure vessels, the physicochemical properties of the gas, and the compressibility factor) the model can be used to determine the quantity of gas transported per vehicle and body combination, the required volumetric capacity, and the number of trips needed to complete the transport task. The execution of a specific transport task, i.e., the transport of a specified gas amount, requires careful consideration of various factors, primarily to ensure transport safety and regulatory compliance, while also achieving an appropriate level of transport efficiency. The model analyses the impacts arising from the vehicle's transport, climatic, and operational–technical characteristics and the physicochemical properties of the gas being transported. The model was validated at the gas–loading site by comparing certain values with the compressed gas amounts per vehicle body. The purpose of the research is to develop a model that will contribute to improving the efficiency of road transport of natural gas by providing relevant data to support decision–making processes related to the selection of new vehicles and bodies, as well as the organisation of existing vehicle capacities, thereby enabling more efficient and environmentally sustainable gas transport.

Keywords: Heavy–Duty Vehicles, Road Transport Of Natural Gas, Compressed Natural Gas, Composite Pressure Vessels, Steel Pressure Vessels, Fuel Consumption, Exhaust Emissions, Exhaust Emission Costs, Vehicle Mass Utilisation, Compressibility Factor

Scientific Field: Traffic engineering

Scientific Subfield: Road Vehicles and Vehicle Dynamics

Sadržaj

Spisak slika X
Spisak tabela XI
1. Uvodna razmatranja 1
1.1. Obrazloženje motiva za izbor teme 1
1.2. Predmet i naučni cilj istraživanja 5
1.3. Polazne hipoteze istraživanja 5
1.4. Očekivani rezultati i doprinosi disertacije 6
1.5. Prikaz organizacije disertacije 7
2. Pregled dosadašnjih istraživanja 8
2.1 Pregled modela procene potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova izduvne emisije 8
2.2 Pregled prethodnih istraživanja u oblasti unapređenja efikasnosti procesa drumskog transporta gasa 10
2.3 Zaključna razmatranja i predlozi za dalja unapređenja 12
3. Savremeni načini transporta prirodnog gasa u funkciji boljeg i efikasnijeg snabdevanja tržišta 13
3.1 Konstrukciona rešenja vozila i nadgradnji namenjenih za transport komprimovanog prirodnog gasa 19
3.1.1 Motorna i priključna vozila 22
3.1.2 Nadgradnje namenjene za transport komprimovanog prirodnog gasa 25
3.1.2.1 Posude izrađene od metalnih materijala Tip–1 26
3.1.2.2 Posude sa osnovom izrađenom od metalnih materijala i delimično obložene kompozitnim materijalima Tip–2 28
3.1.2.3 Posude sa osnovom izrađenom od metalnih materijala i potpuno obložene kompozitnim materijalima Tip–3 29
3.1.2.4 Posude izrađene od nemetalnih materijala i potpuno obložene kompozitnim materijalima Tip–4 31
3.1.3 Bezbedonosni aspekti primene različitih tipova posuda, vozila i nadgradnji namenjenih za transport komprimovanih gasova 33
3.2 Pogonska goriva 35
3.2.1 Regulatorni kontekst – pogonska goriva 43
3.2.2 Izduvna emisija 49
3.2.2.1 Uticaj procesa sagorevanja na sastav izduvne emisije 51
3.2.3 Sistemi za naknadni tretman izduvnih gasova 53
3.3 Metode ispitivanja motornih vozila 56
3.3.1 Metode ispitivanja izduvne emisije 57
3.3.2 Metode merenja potrošnje goriva 59
3.3.2.1 Dijagnostika motornih vozila 63
3.3.3 Metode merenja pređene udaljenosti 66
4. Model procene potrošnje goriva 68
4.1 Opis modela 68
4.2 Definisanje transportnih zahteva 70
4.2.1 Podaci o uslovima eksploatacije 70
4.2.1.1 Količina transportovane robe 71
4.2.1.2 Maseno iskorišćenje vozila 72
4.2.1.3 Gustina vazduha 72
4.2.1.4 Eksploataciona brzina vozila 73
4.2.1.5 Podaci o putnoj mreži i nagibu deonica 74
4.2.1.6 Korektivni faktor potrošnje goriva 74
4.2.2 Podaci o vozilima i nadgradnjama 75
4.3 Definisanje sila koje deluju na sastav vučnog i priključnog vozila 78
4.3.1 Otpor kotrljanju R_f 81

4.3.1.1 Koeficijent otpora kotrljanju f ... 81
4.3.2 Otpor uspona R_u ... 83
4.3.3 Otpor vazduha R_v ... 83
4.3.4 Otpor sistema za prenos snage R_{tr} ... 84
4.3.5 Otpori priključnog vozila R_p ... 85
4.4 Metode određivanja potrošnje goriva ... 87
4.4.1 Metoda određivanja potrošnje goriva primenom brzinske karakteristike motora ... 87
4.4.1.1 Brzinske karakteristike motora pri punom opterećenju ... 88
4.4.1.2 Određivanje potrošnje goriva primenom metode Šlipea ... 89
4.4.1.3 Rezultati metode ... 98
4.4.1.4 Zaključna razmatranja ... 101
4.4.2 Metoda određivanja potrošnje goriva primenom univerzalne karakteristike motora ... 102
4.4.2.1 Univerzalna karakteristika motora ... 103
4.4.2.2 Određivanje potrošnje goriva primenom univerzalne karakteristike motora ... 104
4.4.2.3 Zaključna razmatranja ... 108
4.4.3 Opis i uslovi merenja potrošnje goriva ... 109
4.4.4 Analiza osetljivosti modela ... 113
4.4.5 Zaključna razmatranja ... 114
5. Model procene emisije i troškova emisije izduvnih gasova vozila ... 115
5.1 Opis modela ... 115
5.1.1 Utvrđivanje vrednosti faktora emisije zagađivača ... 117
5.1.2 Utvrđivanje jediničnih troškova zagađivača ... 119
5.1.3 Rezultati modela ... 122
5.2 Analiza osetljivosti modela ... 131
5.3 Zaključna razmatranja ... 132
6. Model procene transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta ... 134
6.1 Opis modela ... 134
6.2 Uvod u značaj drumskog transporta prirodnog gasa ... 135
6.2.1 Tipovi ležišta, hemijski sastav i fizička svojstva prirodnog gasa ... 137
6.2.2 Fizička svojstva i karakteristike gasova ... 140
6.2.3 Jednačina stanja idealnog gasa ... 141
6.2.4 Jednačina stanja realnog gasa ... 143
6.3 Određivanje transportovane količine gasa po vozilu–nadgradnji ... 145
6.4 Određivanje potrebnih zapreminskih kapaciteta ... 148
6.5 Analiza osetljivosti modela ... 151
6.6 Zaključna razmatranja ... 152
7. Zaključak ... 153
8. Literatura ... 155
PRILOG 1 ... 173
Sile i reakcije tla koje deluju na sastav vučnog vozila i prikolice sa baterijskom nadgradnjom opremljenom sa posudama Tip–1 ... 173
Sile i reakcije tla koje deluju na sastav vučnog vozila i prikolice sa MEGC nadgradnjom opremljenom sa posudama Tip–4 ... 177
Sile i reakcije tla koje deluju na sastav tegljača i poluprikolice sa baterijskom nadgradnjom opremljenom sa posudama Tip–1 ... 179
Sile i reakcije tla koje deluju na sastav tegljača i poluprikolice sa MEGC nadgradnjom opremljenom sa posudama Tip–4 ... 182
Podaci o putnoj mreži ... 184
PRILOG 2 ... 185
Regresioni koeficijenti ... 185
Excel VBA kod: ... 185
PRILOG 3 ... 187

Faktor kompresibilnosti najčešćih tehničkih gasova 187
BIOGRAFIJA AUTORA 188
IZJAVA O AUTORSTVU 189
IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA 190
IZJAVA O KORIŠĆENJU 191

Spisak slika

Slika 1. Savremeni načini transporta prirodnog gasa *14*
Slika 2. Vozila i nadgradnje namenjene za transport komprimovanog priridnog gasa *23*
Slika 3. Vučno vozilo – tegljač sa pogonom na KPG *24*
Slika 4. Vučno vozilo – tegljač sa pogonom na dizel *24*
Slika 5. Delimičan presek cilindrične bešavne posude Tip–1 ..... *26*
Slika 6. Baterijsko vozilo sa posudama Tip–1 (Izvor: Autor) *27*
Slika 7. Delimičan presek cilindrične bešavne posude Tip–2 ..... *28*
Slika 8. Skup vozila sa MEGC nadgradnjom i posudama Tip–2 ..... *29*
Slika 9. Delimičan presek cilindrične bešavne posude Tip–3 ..... *30*
Slika 10. Poluprikolica sa MEGC nadgradnjom i posudama Tip–3 ..... *31*
Slika 11. Delimičan presek cilindrične bešavne posude Tip–4 ..... *32*
Slika 12 Poluprikolica sa MEGC nadgradnjom i posudama Tip–4 ..... *32*
Slika 13. Efikasnost redukcije izduvne emisije primenom trostepenog katalizatora *54*
Slika 14. Šema sistema za naknadni tretman izduvnih gasova kod dizel motora *55*
Slika 15. Poređenje zastupljenosti radnog režima motora za testove WHVC i ISC *59*
Slika 16. Izgled dijagnostičkih konektora SAE J1708 i SAE J1939 ..... *64*
Slika 17 Izgled dijagnostičkih konektora OBD II tip A i OBD II tip B *65*
Slika 18. Model procene potrošnje goriva *68*
Slika 19 Korektivni faktor potrošnje goriva *75*
Slika 20. Sile i reakcije tla koje deluju na sastav vučnog vozila i prikolice sa MEGC nadgradnjom Tip–1 ..... *79*
Slika 21. Sile i reakcije tla koje deluju na sastav tegljača i poluprikolice sa baterijskom nadgradnjom Tip–1 ..... *79*
Slika 22. Brzinska karakteristika oto motora pri punom opterećenju *89*
Slika 23. Postupak procene potrošnje goriva zasnovan na metodi Šlipea *90*
Slika 24. Zavisnost koeficijenta Kn od promene broja obrtaja motora *92*
Slika 25. Zavisnost koeficijenta Kη od promene stepena iskorišćenja motora *93*
Slika 26. Zavisnost koeficijenta Kn, Kη u funkciji od promene broja obrtaja i opterećenja motora *94*
Slika 27. Modelom određene prosečne vrednosti potrošnje goriva za skup vozila $BC_{\text{dizel IV}}$ *+ (ST) (Tip–4)* *100*
Slika 28. Modelom određene prosečne vrednosti potrošnje goriva za skup vozila $BC_{\text{dizel IV}}$ *+ (ST) (Tip–4)* *100*
Slika 29. Modelom određene prosečne vrednosti potrošnje goriva za skup vozila BA_{KPG} *(Tip–4)+(T) (Tip–4)* *100*
Slika 30. Modelom određene prosečne vrednosti potrošnje goriva za skup vozila BA_{KPG} *(Tip–1)+(T) (Tip–1)* *101*
Slika 31. Modelom određene prosečne vrednosti potrošnje goriva za oba smera *101*
Slika 32. Dijagram univerzalne karakteristike motora *104*
Slika 33. Metod procene potrošnje goriva zasnovan na dijagramu univerzalne karakteristike *105*
Slika 34. Dijagram univerzalne karakteristike motora sa krivama konstantne snage i potrebne snage za savladavanje svih otpora kretanju *108*
Slika 35. Šema razmatranih skupova vozila *109*
Slika 36. Dijagnostički uređaj ANCEL X7 HD *110*
Slika 37. Očitavanje prosečne potrošnje goriva na mestu istovara robe za vučno vozilo–kamion, koje pripada skupu vozila BA_{KPG} *Tip–1 + (T) Tip–1* *111*
Slika 38. Očitavanje vrednosti prosečne potrošnje goriva na mestu utovara robe za vučno vozilo–tegljač, koje pripada skupu vozila BC_{KPG} *+ (ST) Tip–4* *111*
Slika 39. Koeficijenti osetljivosti pojedinih ulaznih parametara modela *113*
Slika 40 Model procene emisije i troškova emisije izduvnih gasova vozila *115*
Slika 41. Prosečne vrednosti potrošnje goriva različitih skupova vozila *122*
Slika 42. Prosečne vrednosti emisije ugljen–monoksida CO *123*
Slika 43. Prosečne vrednosti emisije azotnih oksida NO_x .....

Slika 44. Prosečne vrednosti emisije nemetanskih isparljivih organskih jedinjenja NMVOC *124*
Slika 45. Prosečne vrednosti emisije ugljen – dioksida CO_2 ..... *125*
Slika 46. Prosečne vrednosti emisije metana CH_4 ..... *126*
Slika 47. Prosečne vrednosti emisije čestičnih materija $PM_{2,5}$ *126*
Slika 48. Raspodela troškova izduvne emisije i troškova goriva *129*
Slika 49. Raspodela troškova izduvne emisije *130*
Slika 50. Analiza osetljivosti modela procene izduvne emisije CO, NO_x i CO_2 ..... *132*
Slika 51. Analiza osetljivosti modela procene izduvne emisije NMVOC, PM i CH_4 ..... *132*
Slika 52. Model procene količine gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta *134*
Slika 53. Poluprikolice sa MEGC nadgradnjama (levo i desno) i baterijska vozilo (sredina) *148*
Slika 54. Analiza osetljivosti modela procene transportovanih količina gasa od molarne mase gasa *151*
Slika 55. Analiza osetljivosti modela procene transportovanih količina gasa od faktora kompresibilnosti *152*

Spisak tabela

Tabela 1. Pregled prethodnih istraživanja u oblasti procene potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova izduvne emisije *8*
Tabela 2. Pregled prethodnih istraživanja u oblasti unapređenja efikasnosti procesa transporta gasova *11*
Tabela 3. Načini transporta prirodnog gasa *15*
Tabela 4. Komparativna analiza između načina i tehnologije transporta prirodnog gasa *16*
Tabela 5. Komparativna analiza između načina i tehnologija drumskog transporta prirodnog gasa *18*
Tabela 6. Slovnobrojčane oznake i hijerarhija nadgradnji namenjenih za transport gasova *20*
Tabela 7. Dodatni tehnički zahtevi za konstrukciju vozila oznaka FL i AT *23*
Tabela 8. Poređenje generacijskih unapređenja posuda namenjenih za transport komprimovanih gasova *33*
Tabela 9. Pregled istraživanja sa stanovišta bezbednosti i sigurnosti primene posuda, vozila i nadgradnji namenjenih za transport gasova *34*
Tabela 10. Zastupljenost pogonskih energenata kod teretnih vozila na različitim tržištima *42*
Tabela 11. Zahtevi koji se odnose na prevenciju rizika od požara u zavisnosti od namene vozila *44*
Tabela 12. Analiza dostupnosti pogonskih energenata na različitim tržištima *46*
Tabela 13. Hronološki pregled uvođenja Euro normi za teretna vozila *49*
Tabela 14. Granične vrednosti štetnih komponenti u izduvnim gasovima kod teretnih vozila u Evropi za nestacionarne uslove ispitivanja *51*
Tabela 15. Tehnološka i konstrukciona rešenja za redukciju izduvne emisije kod teretnih vozila *55*
Tabela 16. Vozni ciklusi koji se primenjuju u postupcima ispitivanja izduvne emisije motornih teretnih vozila *58*
Tabela 17. Pregled metoda za merenje potrošnje goriva *61*
Tabela 18. Metode za merenje pređene udaljenosti *66*
Tabela 19. Dodeljeni parametri koji opisuju uslove eksploatacije *70*
Tabela 20. Vrednosti parametara α i β *74*
Tabela 21. Mase i dimenzije vučnih vozila *76*
Tabela 22. Mase i dimenzije priključnih vozila *76*
Tabela 23. Parametri pogonskih agregata vučnih vozila *77*
Tabela 24. Razmatrani skupovi vozila *78*
Tabela 25. Vrednosti koeficijenta otpora kotrljanju f_o *82*
Tabela 26. Vrednosti koeficijenta otpora vazduha c_x *84*
Tabela 27. Čeone površine poređenh vučnih vozila *84*
Tabela 28. Utvrđene vrednosti regresionih koeficijenata za skup vozila sa baterijskom nadgradnjom i pogonom na dizel gorivo *96*

Tabela 29. Utvrđene vrednosti regresionih koeficijenata za skup vozila sa baterijskom nadgradnjom i pogonom na komprimovani prirodni gas *97*
Tabela 30. Rezultati metode određivanja potrošnje goriva primenom podataka iz brzinske karakteristike motora *98*
Tabela 31. Vrednosti srednjeg efektivnog pritiska p_e za različite opsege P_e i n_e *106*
Tabela 32. Rezultati merenja potrošnje goriva *112*
Tabela 33. Analizirani parametri metode *113*
Tabela 34. Prosečne vrednosti faktora emisije zagađivača za teretna vozila u zavisnosti od vrste pogonskog goriva [g/kg] *117*
Tabela 35. Prosečne vrednosti faktora emisije zagađivača za teretna vozila u zavisnosti od vrste pogonskog goriva i primenjene tehnologije [g/km] *118*
Tabela 36. Prosečne vrednosti faktora emisije zagađivača za teretna vozila u zavisnosti od vrste pogonskog goriva i primenjene tehnologije [g/km] *119*
Tabela 37. Prosečne vrednosti jediničnih troškova zagađivača [€/t] *121*
Tabela 38. Korektivni faktori jediničnih troškova zagađivača u odnosu na privredne sektore *121*
Tabela 39. Prosečne vrednosti eksternih troškova za drumski teretni saobraćaj *130*
Tabela 40. Analizirani parametri metode *131*
Tabela 41. Regulatorni okvir za drumski transport prirodnog gasa *136*
Tabela 42. Hemijski sastav prirodnog gasa iz konvencionalnih ležišta *139*
Tabela 43. Fizičko–hemijski sastav uvoznog prirodnog gasa u Republici Srbiji *139*
Tabela 44. Odstupanja "idealne" i realne zapremine gasa nekih tehničkih gasova *142*
Tabela 45. Kritične veličine i Van der Valsove konstante realnih gasova *144*
Tabela 46. Proračun količine gasa u zavisnosti od tipa posuda, radne zapremine, pritiska i temperature *146*
Tabela 47. Proračun potrebne zapremine posuda za transport određene količine gasa u zavisnosti od pritiska i temperature *149*
Tabela 48. Odstupanja transportovanih i modelom određenih količina gasa po skupu vozila *150*
Tabela 49. Analizirani parametri metode *151*

1. Uvodna razmatranja

1.1. Obrazloženje motiva za izbor teme

Poslednjih nekoliko decenija dešavanja na međunarodnom nivou, kao i geopolitički uticaji vodećih država sveta u potpunosti su izmenili međunarodne okolnosti u energetskom sektoru. Snažni geopolitički uticaji prvenstveno se reflektuju na energetsku suverenost malih država ali i regiona, što dovodi do diverzifikacije izvora, pre svega, trasa snabdevanja nafte i prirodnog gasa. Primarni razlozi diverzifikacije mogu se posmatrati kroz više aspekata, od geopolitičkih, ekonomskih, tehnoloških i svakako do ekoloških uticaja. Međutim, u realnim okolnostima nije moguće u potpunosti odgovoriti na sve uticaje, pa dolazi do favorizacije određenih strateških pravaca koji, u načelu, dovode do održivih kompromisnih rešenja. Jedan od pravaca za ostvarivanje energetske nezavisnosti jeste diverzifikacija izvora snabdevanja, koja u početnoj fazi ne mora biti ekonomski opravdana, jer je najčešće praćena velikim infrastrukturnim ulaganjima, koja prate i razvoj distributivnih sistema snabdevanja krajnih potrošača, ali dugoročno dovode do energetski i ekološki održivih rešenja.

Transport opasne robe, a posebno prirodnog gasa kao jednog od najvažnijih energetskih resursa u svetu, predstavlja ključnu komponentu savremenih energetskih sistema. Kako prirodni gas sve više dobija na značaju, zahvaljujući širokoj primeni, ekonomičnosti i relativno niskom uticaju na životnu sredinu u poređenju sa drugim fosilnim gorivima, dato u Međunarodnoj agenciji za energetiku *(engl. International Energy Agency)* (IEA, 2023), načini distribucije i transporta gasa dobijaju sve više na značaju. Savremeni distributivni sistemi prirodnog gasa zasnivaju se na razvijenoj gasovodnoj infrastrukturi i mrežama gasovoda. Ipak, u uslovima ograničene razvijenosti infrastrukture, što je posebno izraženo u državama sa nedovoljno razvijenom privredom, prisutni su i alternativni načini transporta (Speight, 2018; Deng, Chen, Jia, Gao and Bo, 2018; Reddi, Elgowainy, Rustagi and Gupta, 2018a; Kidnay, Parrish and McCartney, 2019; Van Heerden and Putter, 2021; Mićić, 2020; Buschmann and Gallep, 2024). Drugim rečima, u određenim okvirima efikasno snabdevanje, pored gasovoda, moguće je obezbediti i primenom različitih vidova saobraćaja, poput pomorskog, rečnog, železničkog i drumskog. S druge strane, izbor načina transporta uslovljen je brojnim faktorima, kao što su ekonomska moć i geografski položaj države, dostupnost infrastrukture (luke, terminali, železnička i putna mreža, i dr.), prostorna raspoređenost i međusobna povezanost skladišta, raspoloživost voznih resursa, ali i funkcionalna primenljivost tehnologije i fleksibilnost transporta, koji imaju značajan uticaj na izbor načina transporta.

Funkcionalna primenljivost tehnologije transporta odnosi se na mogućnost integracije u postojeći sistem i povezivanje sa infrastrukturom, opremom ili procesima održavanja i kontrole i dr. Drugim rečima da se sa izabranom tehnologijom obezbedi bezbedan i pouzdan transport, koji će funkcionisati uz odgovarajući nivo efikasnosti i u skladu sa trenutnim razvoj privrede. Za razliku od toga, fleksibilnost transporta od posebnog je značaja u područjima gde trenutni tehnološki kapaciteti ili zakonski okviri onemogućuju razvoj mreže gasovoda (poput planinskih masiva, neadekvatne infrastrukture, nerešene pravne svojine i dr.), a gde je potrebna brza i precizna distribucija gasa (poput snabdevanja udaljenih industrijskh zona, ruralnih zajednica, stanica za snabdevanje gorivom i dr.). U okviru obrazloženja motiva, pre svega kod država sa nedovoljno razvijenom infrastrukturom, čija ekonomska moć i geografski položaj onemogućavaju razvoj i primenu drugih vidova, drumski transport prirodnog gasa pruža funkcionalnu primenljivost i značajnu fleksibilnost u isporuci. Takođe, navedenom doprinosi i kontinuirani razvoj u oblasti teretnih vozila i pokretne opreme pod pritiskom, posebno kroz

primenu savremenih materijala i bezbednosnih sistema, u svrhu sigurnijeg, pouzdanijeg i u zadatim okvirima efikasnijeg snabdevanja krajnjih potrošača.

Pravci razvoja energetskog sektora Republike Srbije, usaglašeni su ili su u postupku usaglašavanja sa pravnim tekovinama Evropske unije i zahtevima koji se postavljaju pred države članice, kao i države koje nastoje da pristupe Uniji. U navedenom kontekstu, privredni sektori (industrija, saobraćaj, domaćinstva, poljoprivreda i dr.) država čije su privrede u razvoju, prepoznati su kao jedni od najvećih zagađivača. Kao odgovor na postavljene zahteve, prvenstveno u cilju smanjenja zagađenja, navedeni sektori su u procesu tranzicije sa dosadašnjih konvencionalnih pogonskih energenata (poput nafte i uglja) na prirodni gas i energente dobijene iz obnovljivih izvora. Republika Srbija nastoji da sve privredne sektore prilagodi zahtevima koji se pred nju postavljaju, sa primarnim ciljem očuvanja privrednog rasta i životne sredine, definisano Strategijom razvoja energetike Republike Srbije, u daljem tekstu (Strategija, 2024). Međutim, potpuni prelazak privrednih sektora na prirodni gas podrazumeva i velika investiciona ulaganja, koja obuhvataju izgradnju mreže gasovoda, skladišta, merno–regulacionih i primopredajnih stanica, kao i sistema distribucije do krajnjih korisnika. Shodno navedenom, može se zaključiti da u državama čije su privrede u razvoju, potpuna gasifikacija predstavlja složen i dugotrajan proces. Stoga, u cilju realizacije započetih procesa tranzicije, neophodno je obezbediti efikasno snabdevanje gasom krajnjih korisnika u kojem drumski transport gasa ima značajnu ulogu.

S obzirom na to da se prirodni (zemni) gas svrstava u lako zapaljive gasove sa visokim sadržajem metana i klasifikuje kao opasna materija, postupci manipulacije, skladištenja i distribucije definisani su nacionalnim i međunarodnim propisima koji uređuju drumski transport opasne robe, poput Zakona o transportu opasne robe, Uredbi o pokretnoj opremi pod pritiskom, Sporazum o međunarodnom drumskom prevozu opasne robe, u daljem tekstu Sporazum (ECE/352), i dr. Pored navedenih propisa i postupaka manipulacije, u Sporazumu su definisani i tehnički zahtevi koji se odnose na konstrukciju i odobrenje tipa vozila i nadgradnji namenjenih za transport opasnih materija.

Razvoj i transformacija privrednih sektora ka ekološki prihvatljivijim energentima praćeni su i razvojem drumskog transporta opasne robe, koji ima značajnu ulogu u sistemu snabdevanja privrednih sektora raznih dobara, uključujući i prirodni gas. Poslednjih nekoliko decenija razvoj drumskog transporta robe karakterišu sve stroži zahtevi koji se postavljaju kako pred proizvođače, tako i pred korisnike vozila. Ovi zahtevi, s jedne strane, odnose se na regulatorne propise usmerene na unapređenje bezbednosti, smanjenje izduvnih emisija i ublažavanje negativnih uticaja na životnu sredinu i dr. S druge strane, pod uticajem tržišnih zahteva, ističu se i uslovi koji se odnose na podizanje efikasnosti vozila, kroz smanjenje potrošnje goriva, skraćenje vremena transporta, transport većih količina robe i dr. Nadovezujući se na navedene zahteve, prilikom projektovanja vozila i nadgradnji za transport opasne robe poseban akcenat stavlja se na bezbednost i sigurnost. Drugim rečima, konstrukcija vozila i nadgradnji mora biti izvedena sa takvim rešenjima koja obezbeđuju visok stepen sigurnosti i pouzdanosti svih komponenti, sistema i vozila u celini, tokom projektovanog radnog veka vozila i nadgradnje, kao i tokom vremenskih intervala između obaveznih redovnih kontrola. U skladu sa navedenim, u zavisnosti od svojstava i klase opasne robe koja se transportuje, posebno se definišu tehnički zahtevi koje vozila moraju da ispune. Ovi zahtevi se odnose, pre svega, na konstrukciju i tehničke karakteristike vozila, koji uključuju elektroopremu, pogonski sistem i pogonske energente (goriva), sistem kočenja, uređaje za spajanje vučnih i priključnih vozila, uređaje za ograničenje brzine kretanja i dr. Polazeći od prethodno navedenih zahteva ali i regulatornih propisa, u svrhu održivog i efikasnijeg drumskog transporta opasne robe, nameće

se potreba preispitivanja koje se vrste pogonskih energenata mogu i smeju primeniti za pogon teretnih vozila, kao i koji se materijali mogu koristiti za izradu nadgradnji. Kao odgovor na regulatorne propise i uslove tržišta, proizvođači vozila i nadgradnji nastoje da unaprede efikasnost vozila na više načina. Unapređenja se ogledaju kroz poboljšanja konstrukcije i tehničkih karakteristika, koja uključuju primenu novih tehničkih rešenja i materijala, što doprinosi značajnom smanjenju sopstvenih masa i povećanju transportovanih količina robe po vožnji. Takođe, pored navedenog, proizvođači vozila intenzivno rade i na razvoju novih pogonskih sistema i tehnologija za naknadni tretman izduvnih gasova, gde se pored konvencionalnih pogona razmatraju i alternativni, prvenstveno gasovita goriva, ali i električni i vodonični pogon. Primena alternativnih pogona kod teretnih vozila namenjenih za transport opasnih materija, poput elektropogona i vodonika, čak i u najrazvijenijim državama sveta još uvek je u početnim fazama uvođenja, dok usaglašavanje sa strogim zahtevima navedenim u Sporazumu (ECE/352) i njihova realna primena tek predstoji. S obzirom na prethodno navedeno, kako na domaćem tako i na globalnom nivou, konvencionalno dizel gorivo se i dalje smatra osnovnim pogonom za teretna vozila, dok se tranzicija ka alternativnim pogonima odvija postepeno u skladu sa ekonomskim i tehnološkim mogućnostima država.

U slučaju Republike Srbije, imajući u vidu trenutne tehnološke mogućnosti i dostupnu infrastrukturu, jedno od rešenja za potencijalno smanjenje zagađenja jeste postepeno uvođenje prirodnog gasa kao pogonskog goriva za teretna vozila, što je u skladu sa strateškim pravcima razvoja energetike (Strategija, 2024). S druge strane, paralelno sa razvojem pogonskih goriva, intenzivno se razmatra i primena novih materijala za izradu nadgradnji namenjenih za skladištenje i transport prirodnog gasa. Ovi materijali, pored unapređenja efikasnosti transporta kroz omogućavanje transporta većih količina gasa po vožnji, imaju i značajan uticaj na smanjenje zagađenja i očuvanje životne sredine. Unapređenja se zasnivaju na daljem razvoju tehnologija izrade posuda pod pritiskom, prvenstveno kroz primenu lakših kompozitnih materijala, čime se doprinosi poboljšanju njihovih tehničkih karakteristika. Poboljšanja tehničkih karakteristika ogledaju se kroz smanjenje masa praznih posuda i povećanje radnog pritiska i zapremine. Smanjenje sopstvenih masa posuda, a time i mase nadgradnje, rezultira smanjenjem ukupne mase vozila, što može doprineti smanjenju potrošnje goriva i redukciji emisije izduvnih gasova. Kako je u fokusu pitanje obezbeđenja dovoljnih količina energenata za neometano funkcionisanje privrede i društva, uz ublažavanje negativnih uticaja na životnu sredinu, Strategijom razvoja energetike (Strategija, 2024) definisani su pravci razvoja energetskog sektora ali i podržanih sektora privrede. Pri tome, deo naglašenih pravaca razvoja:

- Postojeći raspoloživi resursi ostaju oslonac energetskog sektora Republike Srbije;
- Uvoznu zavisnost od nafte i prirodnog gasa u svim sektorima privrede potrebno je smanjiti diverzifikacijom energetskih izvora snabdevanja i primenom mera za unapređenje energetske efikasnosti i korišćenje energenata dobijenih iz obnovljivih izvora;
- Dekarbonizaciju i smanjenje zagađenja svih sektora privrede sprovesti primenom ekološki prihvatljivijih energenata, prvenstveno prirodnog gasa i energenata dobijenih iz obnovljivih izvora energije (poput vetra, biomase, hidroenergije i dr.);
- Primenom poreskih modela zasnovanih na dodatnom oporezivanju emisije ugljen-dioksida i drugih izduvnih gasova koji doprinose zagađenju, kontrolisati dinamiku tranzicionog procesa.

U skladu sa navedenim pravcima razvoja energetskog sektora, a imajući u vidu stanje u privredi i nedovoljno razvijenu mrežu gasovoda, kao i distributivnih sistema, neophodno je razmotriti i uspostaviti efikasan sistem snabdevanja prirodnim gasom do krajnjih potrošača. Jedan od

ključnih parametara koji mogu direktno uticati na funkcionisanje ovog sistema su adekvatna vozila i nadgradnje namenjene za skladištenje i transport prirodnog gasa. Vodeći se navedenim, kao odgovor na pravce razvoja i povećanu potražnju za prirodnim gasom, jedan od težišnih zadataka transportnih preduzeća čija je osnovna delatnost transport gasova, jeste razvoj sopstvenih kapaciteta distribucije. U datom kontekstu, porast potražnje za prirodnim gasom u industrijskom sektoru nameće potrebu za efikasnijim, ekonomski isplativijim i ekološki prihvatljivijim vozilima i nadgradnjama namenjenim za skladištenje i transport prirodnog gasa.

Imajući u vidu pomenuto, istraživanje u okviru ove disertacije biće usmereno na razvoj originalnih modela koji predstavljaju prilog sveobuhvatnoj metodologiji za izbor vozila i nadgradnji u drumskom transportu gasova, kao i doprinos unapređenju procesa transporta prirodnog gasa, a u skladu sa pravcima razvoja energetskog sektora Republike Srbije. Kada je reč o izboru adekvatnih vozila i nadgradnji za realizaciju transportnog zadatka, odnosno transporta određene količine gasa, pored regulatornih odredbi i bezbednosnih zahteva koji se ne dovode u pitanje, deo ključnih parametra koji opisuju efikasnost vozila i nadgradnji su: potrošnja goriva, emisija izduvnih gasova, masena iskorišćenja, transportovane količine robe po vožnji i potrebni zapreminski kapaciteti u odnosu na zahtevane količine robe. Razvoj modela za procenu potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova emisije izduvnih gasova, transportovanih količina robe i potrebnih zapreminskih kapaciteta, kod vozila i nadgradnji namenjenih za skladištenje i transport prirodnog gasa, ima značajan praktičan doprinos kako na domaćem, tako i na globalnom nivou. Primarno u malim državama sa slabije razvijenom privredom i infrastrukturom, ovakvi modeli mogu predstavljati značajnu podršku procesima transporta prirodnog gasa ali i izboru vozila i nadgradnji, doprinoseći ostvarivanju postavljenih ciljeva, prvenstveno kroz unapređenje efikasnosti transporta i očuvanja životne sredine.

Polazeći od prethodno navedenog i uzimajući u obzir složenost oblasti, motivi za odabir teme predloženog istraživanja proističu iz zahteva privrednog sektora za kontinuiranim snabdevanjem krajnih korisnika prirodnim gasom, pritom ne zanemarujući trenutne skromne privredne i infrastrukturne resurse, kao i distributivne kapacitete–mrežu gasovoda. Drumski transport prirodnog gasa, iako predstavlja neefikasan način transporta ukoliko se strogo posmatraju masena iskorišćenja vozila i poredi sa drumskim transportom drugih dobara, omogućava brzu i u zadatim okvirima efikasnu razmenu dobara. Takođe, u okviru predmetnog razmatranja, motivi proističu i iz nedovoljnog razumevanja između transportnih preduzeća i regulatornih tela u pogledu primene vozila i nadgradnji, prvenstveno u delu koji se odnosi na kodnu oznaku vozila i nadgradnji, odnosno na dozvoljene vrste pogonskih goriva i materijale za izradu nadgradnji. S tim u vezi, a imajući u vidu ograničenja definisana Sporazumom (ECE/352), u cilju održivog drumskog transporta prirodnog gasa, neophodno je razmatrati ne samo vrstu pogonskog goriva, već i kompatibilnost materijala nadgradnji sa gasom koji se transportuje. U navedenom kontekstu, motiv istraživanja ogleda se u potencijalnim unapređenjima efikasnosti procesa transporta, kao i u doprinosu donošenju odluka pri izboru vozila i nadgradnji, kroz primenu novih vrsta pogonskih goriva i savremenih materijala za izradu nadgradnji. Kao dopuna navedenom, jedan od polaznih razloga za odabir teme odnosi se i na činjenicu da se u transportnim preduzećima modeli i softveri za procenu potrošnje goriva, izduvnih emisija i troškova emisije izduvnih gasova, uprkos njihovoj širokoj zastupljenosti u literaturi, retko primenjuju u praksi. Pored toga, modeli namenjeni proceni transportovanih količina gasa po vožnji ili potrebnih zapreminskih kapaciteta gotovo da se i ne koriste, što je posebno značajno imajući u vidu složenost i važnost ovih procesa.

1.2. Predmet i naučni cilj istraživanja

Predmet istraživanja odnosi se na unapređenje efikasnosti procesa drumskog transporta prirodnog gasa, kao i doprinos postupcima izbora vozila i nadgradnji namenjenih za skladištenje i transport prirodnog gasa, primenom naučno utemeljenih metoda iz oblasti saobraćaja i mašinstva. Istraživanje se fokusira na vozila i nadgradnje namenjene za skladištenje i transport prirodnog gasa. Prvenstveno se razmatraju uticaji pogonskih goriva (konvencionalno dizel gorivo i alternativno gorivo–prirodni gas) i novih materijala za izradu nadgradnji na parametre potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova emisije, masenih iskorišćenja, transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta u odnosu na zahtevane količine gasa.

Cilj istraživanja jeste razvoj modela koji će omogućiti unapređenje efikasnosti procesa drumskog transporta prirodnog gasa i doprineti postupcima izbora vozila i nadgradnji, čime se obezbeđuje efikasniji i ekološki prihvatljiviji transport. Razvijeni modeli integrišu eksploataciono–tehničke karakteristike vozila i nadgradnji sa uslovima eksploatacije i fizičko–hemijskim svojstvima gasa koji se transportuje, u cilju procene potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova emisije izduvnih gasova, masenih iskorišćenja, transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta u odnosu na zahtevane količine gasa. U skladu sa opštim ciljem, izdvajaju se sledeći specifični ciljevi istraživanja, među kojima je utvrđivanje relevantnosti i primenljivosti generacijskih unapređenja tehničkih karakteristika posuda namenjenih za skladištenje i transport prirodnog gasa, u kontekstu unapređenja efikasnosti transporta, kao i prirodnog gasa kao alternativnog pogonskog goriva, uzimajući u obzir specifičnosti radnog okruženja, regulatorne zahteve i raspoloživu infrastrukturu. Takođe, cilj je i identifikacija zastupljenosti pogonskih energenata kod teretnih vozila kako na domaćem, tako i na inostranim tržištima, kao i njihovu moguću primenu u odnosu na raspoloživu infrastrukturu i trenutni razvoj privrede, regulatorna ograničenja i zahteve koji se odnose na pogonske sisteme i pogonske goriva u zavisnosti od kodne oznake vozila. Paralelno sa utvrđivanjem zastupljenosti pogonskih energenata, kao dodatni cilj izdvaja se identifikacija uticaja tipa ležišta na fizičko–hemijska svojstva prirodnog gasa, kao i promena radnih uslova (pritiska, temperature i faktora kompresibilnosti) na masena iskorišćenja, količine transportovanog gasa i potrebne zapreminske kapacite. U okviru postavljenih ciljeva ističe se i razvoj novog pristupa transportu gasa, kojim se omogućava optimizacija upotrebe postojećih voznih resursa u skladu sa raspoloživim kapacitetima i zahtevanim količinama gasa.

1.3. Polazne hipoteze istraživanja

Polazne hipoteze istraživanja su:

- Transportni, putni i klimatski uslovi eksploatacije utiču na potrošnju goriva, izduvnu emisiju i troškove emisije izduvnih gasova kod vozila i nadgradnji namenjenih za skladištenje i transport prirodnog gasa. Modeliranjem potrošnje goriva, emisije i troškova emisije izduvnih gasova moguće je unaprediti efikasnost transporta i doprineti redukciji emisije izduvnih gasova i negativnih uticaja na životnu sredinu;

- Radni uslovi (pritisak, temperatura i faktor kompresibilnosti gasa koji se transportuje) utiču na količinu transportovanog gasa po vozilu i nadgradnji, kao i na potrebne zapreminske kapacitete. Modeliranjem transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta u odnosu na zahtevane količine gasa, moguće je unaprediti efikasnost transporta, boljom

organizacijom postojećih voznih kapaciteta, transportom većih količina gasa, ali i doprineti redukciji emisije izduvnih gasova;

• Modeliranje potrošnje goriva, izduvne emisije i njenih troškova, masenih iskorišćenja, transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta, doprinosi odlukama o izboru optimalnog vozila i nadgradnje za skladištenje i transport prirodnog gasa;

• Generacijska unapređenja tehničkih karakteristika posuda pod pritiskom namenjenih za skladištenje i transport prirodnog gasa, zajedno sa primenom prirodnog gasa kao alternativnog goriva za pogon vozila, mogu doprineti unapređenju efikasnosti transporta, boljem masenom iskorišćenju vozila i transportu većih količina gasa, uz smanjenje emisije izduvnih gasova i negativnih uticaja na životnu sredinu.

1.4. Očekivani rezultati i doprinosi disertacije

Polazeći od jasno definisanog predmeta i cilja istraživanja, očekuje se da će ostvareni rezultati omogućiti usvajanje novih modela za procenu potrošnje goriva, emisija izduvnih gasova, troškova emisija, masenih iskorišćenja, kao i količine transportovanog gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta. Razvijeni modeli treba da doprinesu postupcima izbora vozila i nadgradnji za transport prirodnog gasa pružanjem pouzdane podrške postupcima odlučivanja. Takođe, očekuje se da će rezultati modela doprineti unapređenju efikasnosti procesa transporta u preduzećima čija je osnovna delatnost transport gasova. Sa aspekta naučne vrednosti i praktične primene, najvažniji doprinosi odnose se na:

• Razvoj jedinstvenih modela za procenu potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova emisije izduvnih gasova vozila namenjenih za transport prirodnog gasa, koji uzimaju u obzir specifičnosti transporta, čime bi se stvorili uslovi za unapređenje efikasnosti drumskog transporta gasa i očuvanje životne sredine;

• Razvoj novog modela za procenu transportovanih količina gasa, masenih iskorišćenja i potrebnih zapreminskih kapaciteta u zavisnosti od zahtevnih količina gasa, čime bi se stvorili uslovi za unapređenje efikasnosti procesa drumskog transporta gasa, kroz bolju organizaciju postojećih voznih kapaciteta, uz istovremeno smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu;

• Teorijske i praktične smernice prilikom izbora vrste pogonskih goriva u zavisnosti od kodne oznake vozila, kao i smernice za izbor nadgradnji namenjenih za skladištenje i transport prirodnog gasa, zasnovane na kodnoj oznaci vozila i generacijskim unapređenjima tehničkih karakteristika posuda pod pritiskom;

• Teorijske i praktične smernice prilikom izbora optimalnog vozila i nadgradnje u zavisnosti od raspoloživih voznih kapaciteta, uvođenjem fizičko–hemijskih svojstava gasa za preciznije određivanje transportovane količine gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta po vožnji;

• Prilog razvoju sveobuhvatne metodologije za izbor vozila i nadgradnji namenjenih transportu gasova, kroz objedinjavanje razvijenih modela i ostvarenih rezultata. Razvijeni modeli obezbediće značajnu podršku u procesima drumskog transporta prirodnog gasa.

1.5. Prikaz organizacije disertacije

U skladu sa motivima za izbor teme, predmetom istraživanja i postavljenim ciljevima, struktura rada podeljena je po sledećim poglavljima:

Prvo poglavlje, obuhvata uvod u disertaciju, definiše i obrazlaže motive za izbor teme, predmet i naučni cilj istraživanja, polazne hipoteze, očekivane rezultate i doprinose istraživanja, kao i pregled organizacije disertacije.

U drugom poglavlju izvršen je pregled literature koja se odnosi na dosadašnja istraživanja u oblasti drumskog transporta prirodnog gasa, kao i na metode i modele za procenu potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova emisije izduvnih gasova, transportovanih količina robe i potrebnih zapreminskih kapaciteta.

Treće poglavlje sadrži analizu i pregled konstrukcionih rešenja vozila i nadgradnji namenjenih za transport prirodnog gasa u komprimovanom stanju, sa fokusom na regulatorne zahteve i tehničke specifičnosti koje se primenjuju u skladu sa kodnom oznakom vozila i nadgradnje za transport opasne robe. Takođe, ovo poglavlje obuhvata i pregled literature koja se odnosi na pogonska goriva, sa posebnim akcentom na zastupljenost kako na domaćem tako i na međunarodnom tržištu. Pored navedenog, izvršen je pregled i opis regulatornih propisa koji se odnose na pogonska goriva i emisiju izduvnih gasova, kao i metoda merenja potrošnje goriva. Cilj ovog poglavlja jeste da obezbedi jasan i sistematičan okvir za sprovođenje istraživanja kroz prikaz regulatornih ograničenja koja se pre svega odnose na pogonska goriva i materijale za izradu nadgradnji.

U četvrtom, petom i šestom poglavlju opisani su modeli za procenu potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova emisije izduvnih gasova, kao i modeli za procenu transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta. U okviru navedenih poglavlja predstavljeni su opisi i strukture modela, teorijske osnove, ulazni parametri, postupci i opisi integrisanih metoda, načini obrade podataka, kao i povezanost modela sa regulatornim ograničenjima, uslovima vožnje i potrebama privrede. Pored navedenog, prikazani su rezultati modela uz prateća zaključna razmatranja. U svrhu validacije modela prikazani su rezultati merenja potrošnje goriva i transportovanih količina gasa u realnim uslovima vožnje za skupove vozila sa različitim pogonskim gorivima i nadgradnjama. Takođe, pored definisanja i razvoja modela izvršen je izbor metoda za ocenu osetljivosti modela, prvenstveno u cilju utvrđivanja u kojoj meri promene ulaznih parametara utiču na izlazne rezultate. Cilj ovih poglavlja jeste da se obezbedi jasan i sistematičan okvir za utvrđivanje dela parametara sa kojima se može opisati efikasnost vozila i nadgradnji namenjenih za transport komprimovanog prirodnog gasa.

U poslednjem poglavlju rada izvršena je analiza ključnih rezultata sprovedenog istraživanja, istaknuti su naučni i praktični doprinosi istraživanja, data su obrazloženja o ispunjenosti polaznih hipoteza i ostvarenju postavljenih ciljeva disertacije i predstavljeni su pravci budućih istraživanja.

2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Istraživanje prezentovano u radu ima svrhu da pruži doprinos u postupcima izbora vozila i nadgradnji, sa ciljem unapređenja efikasnosti drumskog transporta prirodnog gasa, kroz razvoj modela sa kojima je moguće proceniti deo parametara koji opisuju efikasnost vozila. Modeliranje parametara, poput potrošnje goriva, izduvne emisije i njenih troškova, masenih iskorišćenja, transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta, može doprineti boljoj efikasnosti i iskorišćenju vozila, unapređenju organizacije rada, kao i većem zadovoljstvu krajnjih korisnika. Radi jasnijeg sagledavanja konteksta istraživanja prezentovanog u radu, pregled dosadašnjih istraživanja podeljen je na oblasti istraživanja procene potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova izduvne emisije, kao i na prethodna istraživanja koja se mogu povezati sa oblastima unapređenja efikasnosti procesa drumskog transporta gasova.

2.1 Pregled modela procene potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova izduvne emisije

Pregled dosadašnje literature u oblasti procene potrošnje goriva, izduvne emisije i njenih troškova ukazuje na to da se posebna pažnja i interesovanje posvećuje razvoju metodologija i modela za analizu različitih paramatara u svrhu simulilacije realnih uslova eksploatacije vozila. Konceptualno, razvijene metodologije i modeli mogu se podeliti na mikro i makro modele, što je prikazano u Tabeli 1. Mikro modeli su usmereni na procenu traženih parametara na nivou pojedinačnih vozila (Barth, Younglove and Scora, 2005; Edwardes and Rakha, 2014; Dindarloo and Siami-Irdemoosa, 2016; Perrotta, Parry and Neves, 2017; Fang, Song, Chen and Gui, 2019; Kan, Liu, Lu and Chen, 2020; Pereira, Parente, Moutinho and Sampaio, 2021; Katreddi and Thiruvengadam, 2021; Gong, Shang, Li, Zhang, He and Ma, 2021; Alamdari, Basiri, Mousavi and Soofastaei, 2022; Peng, Wang, Xu and Chen, 2023; Lei, Yang, Fu, Chao, Dai and Yuan, 2024), dok su makro modeli zasnovani na širim sistemima i usmereni su na kategorije vozila (Ivković, Kaplanović and Milovanović, 2017b; Ivković, Čokorilo and Kaplanović, 2018; Ivković, Kaplanović and Sekulić, 2019; Čokorilo, Ivković and Kaplanović, 2019; Weller, Lipp, Röck, Matzer, Bittermann and Hausberger, 2019).

Tabela 1. Pregled prethodnih istraživanja u oblasti procene potrošnje goriva, izduvne emisije i troškova izduvne emisije

Istraživanje	Kategorija vozila / Vrsta pogonskog goriva	Opis
Barth et. al., 2005.	Teretna vozila / Dizel	U okviru programa Comprehensive Modal Emissions Modeling (CMEM) razvijen je model zasnovan na empirijskom pristupu izračunavanja izduvne emisije i potrošnje goriva kod teretnih motornih vozila, primenom ulaznih parametra koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, putnih, transportnih i klimatskih uslova eksploatacije. Model je razvijen za analizu kretanja vozila u različitim režimima vožnje, uključujući ravnomerno, ubrzano i kretanje sa usporenjem, pri čemu je omogućena procena izduvne emisije i potrošnje goriva svake sekunde. Prosečna greška modela iznosi oko 5%. Kalibracija modela izvršena je na osnovu putnih merenja primenom dijagnostičkog uređaja, pri čemu su posebno razmatrani uticaji režima vožnje i nagiba puta.

Edwardes and Rakha, 2014.	Autobusi / Hibridni i Dizel pogon	U okviru Virginia Tech projekta razvijen je model procene potrošnje goriva i emisije CO_2 za različite režime kretanja vozila, kretanje sa ubrzanjem, usporenjem i konstantnom brzinom. Model je zasnovan na izračunavanju potrošnje goriva i emisije CO_2 na osnovu utvrđenih otpora kretanju, koji potiču od tehničkih karakteristika vozila, putnih, transportnih i klimatskih uslova eksploatacije. Tačnost modela u zavisnosti je od kvaliteta ulaznih podataka i referentnih vrednosti dobijenih merenjima. Prosečna greška modela u poređenju sa referentnim vrednostima dobijenim u laboratorijskim uslovima, primenom šasijskih dinamometara, iznosila je 4,7%. S druge strane, greška modela u odnosu na vrednosti dobijene putnim merenjima, iznosila oko 22%. Kalibracija modela izvršena je na osnovu laboratorijskih i putnih merenja.
Dindarloo and Siami-Irdemoosa, 2016.	Teretna vozila / Dizel/	U radu je razvijen model procene potrošnje goriva na osnovu ulaznih podataka koji potiču od uslova eksploatacije vozila u rudnicima. Primenom ulaznih parametara o broju potrebnih vožnji za realizaciju određenog transportnog zadatka i operativnog vremena rada, koji obuhvata podatke o vožnji sa opterećenjem i bez opterećenja, vremenu zadržavanja na mestima utovara i istovara robe i vremenom utrošenom na čekanje, vrši se procena potrošnje goriva. Model je zasnovan na metodama parcijalne regresije najmanjih kvadrata i ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) modela. Prosečna greška modela iznosi oko 7,7%. Budući da su osnovni principi isti, i za duže i za kraće trase, model je potrebno kalibrisati popravnim faktorima koji dodatno opisuju putne i transportne uslove.
Perrotta et. al., 2017.	Teretna vozila / primenljivo na sve vrste pogonskih goriva	U istraživanju je prezentovan model procene potrošnje goriva kod sastava vozila, tegljača i poluprikolica, za režim kretanja konstantnom brzinom. Model je razvijen u svrhu praćenje rada vozila i donošenja odluka u vezi operativnih troškova i obuka vozača. Postupak procene potrošnje goriva zasnovan je na metodama mašinskog učenja SVM (Support Vector Machine), RF (Random Forest), ANN (Artificial Neural Network), kao i velikog broja ulaznih parametara koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, putnih, transportnih uslova eksploatacije. Prosečna greška modela iznosi oko 3%. Kalibracija modela i podržanih metoda SVM/RF/ANN izvršena je na osnovu više unakrsnih validacija sa podacima dobijenim putnim merenjima.
Ivković i ostali, 2017b, 2019.	Autobusi / Hibridni, Dizel i pogon na KPG	U okviru istraživanja analizirani su uticaji putnih i saobraćajnih uslova na potrošnju i troškove goriva, kao i troškove emisije CO_2 kod autobusa različitih tehnologija. Analiza je izvršena za uslove međugradske vožnje na putnoj mreži Republike Srbije. Modeli procene potrošnje goriva, troškova goriva i emisije CO_2, razvijeni su za režim kretanja konstantnom brzinom. Postupci procene zasnovani su na izračunavanju parametara potrošnje goriva na osnovu podataka o prosečnoj eksploatacionoj brzini, međusobnom uticaju vozila u saobraćajnom toku, tipu, konfiguraciji terena i dr. Troškovi goriva i emisije CO_2 određuju se na osnovu dobijene potrošnje goriva i trenutnih cena energenata, odnosno referentnih vrednosti troškova emsije CO_2, gasa koji doprinosi stvaranju efekata staklene bašte. Kalibracija modela izvršena je popravnim faktorima koji dodatno opisuju putne i saobraćajne uslove. Doprinos rada ogleda se u poređenju ekonomskih i ekoloških efekata primene dizel, hibridnih i KPG autobusa.
Ivković i ostali, 2018; Čokorilo i ostali, 2019.	Primenljivo na sve kategorije / Benzin, Dizel, KPG i TNG	U istraživanjima prezentovane su metodologije za procenu izduvnih emisija gasova koji doprinose efektu staklene bašte i zagađenju vazduha, kao i pripadajućih eksternih troškova, u svrhu kvantifikovanja uticaja primene drumskog i vazdušnog saobraćaja. Metodologija za drumski saobraćaj zasnovana je na izračunavanju potrošnje goriva, primenom podataka o prosečnom godišnjem dnevnom saobraćaju, prosečnoj eksploatacionoj brzini, stanju kolovozne konstrukcije, tipu i konfiguraciji terena i dr. Izduvna emisija i njeni troškovi određuju se na osnovu dobijene potrošnje goriva i referentnih vrednosti emisionih faktora, definisanih za svaku kategoriju vozila u odnosu na vrstu goriva. Troškovi emisije izračunavaju se primenom određenih vrednosti izduvne emisije za svaku kategoriju vozila i referentnih vredosti emisionih faktora, definisanih za svaku pojedinačnu zagađujuću materiju. Doprinosi istraživanja ogledaju se u definisanju metodologija sa kojima je moguće izvršiti procene i kvantifikacije uticaja primene različitih vidova saobraćaja na životnu sredinu, u vidu eksternih troškova gasova koji doprinose efektu staklene bašte i zagađenja vazduha.
Fang et. al., 2019.	Primenljivo na sve kategorije / primenljivo na sve vrste pogonskih goriva	U radu je razvijen model za procenu potrošnje goriva kod vozila u odnosu na različite režime rada motora. Model je zasnovan na metodama mašinskog učenja CNN (Convolutional Neural Networks), GAN (Generative Adversarial Networks) i velikog broja ulaznih parametara koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i motora, prvenstveno podataka o karakteristikama primenjenih motora, tj. zavisnostima motorskih veličina (poput efektivne snage, obrtnog momenta i specifične potrošnje goriva) od broja obrtaja kolenastog vratila. Prosečna greška modela, za sve primenjene metode mašinskog učenja, iznosi oko 5%. Kalibracija modela i podržanih metoda izvršena je na osnovu učenja i više unakrsnih validacija sa podacima prethodnih istraživanja dobijenih putnim merenjima.
Weller et. al., 2019	Primenljivo na sve kategorije / primenljivo na sve vrste pogonskih goriva	U okviru istraživanja PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) razvijen je model za procenu potrošnje goriva i izduvne emisije vozila. Model je zasnovan na ulaznim parametrima koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i motora, putnih, transportnih i klimatskih uslova eksploatacije. Pritom, posebno su razmatrani uticaji parametara poput aerodinamičkih karakteristika vozila, masa, nagiba puta, pređenog rastojanja, vrste kolovozne konstrukcije na ukupne otpore kretanju i promenu brzine vozila. Parametri koji

		potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, poput zavisnosti motorskih veličina efektivne snage, specifične potrošnje goriva i dr., od broja obrtaja kolenastog vratila, dobijeni su na osnovu prethodnih laboratorijskih ispitivanja, primenom šasijskih dinamometara, kao i ispitivanjima u realnim uslovima vožnje. Prosečna greška modela, u odnosu na primenjene metode merenja iznosi oko 6%. Kalibracija je izvršena na osnovu više unakrsnih validacija sa prethodnim podacima dobijenim putnim merenjima i softverskog rešenja VECTO (Vehicle Energy Consumption calculation Tool).
Kan et. al., 2020.	Teretna vozila / primenljivo na sve vrste pogonskih goriva	U okviru istraživanja razvijen je model za procenu potrošnje goriva na osnovu potrebne snage motora za savladavanje otpora kretanju za različite režime vožnje, uključujući ravnomerno kretanje, ubrzavanje i usporavanje. Model je zasnovan na metodi mašinskog učenja ANN i velikom broju ulaznih parametara koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, putnih, transportnih uslova eksploatacije. Prosečna greška modela iznosi oko 14%. Kalibracija je izvršena na više unakrsnih validacija sa podacima prethodnih istraživanja dobijenih putnim merenjima.
Katreddi and Thiruvengadam, 2021.	Teretna vozila / primenljivo na sve vrste pogonskih goriva	U okviru istraživanja razvijen je model za različite režime vožnje, zasnovan na metodi mašinskog učenja ANN i ulaznim parametrima, poput potrebne snage motora za savladavanje otpora kretanju, broja obrtaja kolenastog vratila i brzine vozila. Prosečna greška modela iznosi 1%. Kalibracija je izvršena na osnovu učenja i više unakrsnih validacija sa podacima dobijenim putnim merenjima.
Pereira et. al., 2021.	Teretna vozila / Dizel	U radu je razvijen model za procenu potrošnje goriva kod teretnih motornih vozila za različite režime kretanja. Model je zasnovan na metodama mašinskog učenja SVM, RF i ANN i ulaznim parametrima koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, putnih i transportnih uslova eksploatacije, pri čemu su posebno razmatrani uticaji mase tereta, nagiba puta, pređenog rastojanja i vrste kolovozne konstrukcije. Prosečna greška modela iznosi oko 8%. Kalibracija modela izvršena je na osnovu putnih merenja.
Gong et. al., 2021.	Teretna vozila / Dizel	U istraživanju je razvijen model za procenu potrošnje goriva za različite režime kretanja vozila u svrhu praćenje rada vozila i donošenja odluka prilikom upravljanja. Model je zasnovan na metodama mašinskog učenja (RF, BPNN (Back–Propagation Neural Network) i DT (Decision Tree) i velikog broja ulaznih parametara, koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, putnih, transportnih i klimatskih uslova eksploatacije. Prosečna greška modela, zu sve primenjene metode mašinskog učenja, iznosi oko 13%. Kalibracija modela i podržanih metoda izvršena je na osnovu učenja i više unakrsnih validacija sa podacima dobijenim putnim merenjima.
Alamdari et. al., 2022.	Teretna vozila / Dizel	U radu razvijen je model procene potrošnje goriva za različite režime kretanja vozila na osnovu ulaznih podataka koji potiču uslova eksploatacije teških teretnih vozila u rudnicima. Model je zasnovan na metodama mašinskog učenja SVM, RF, ANN, linearnoj regresiji i velikom broju ulaznih parametara koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, putnih i transportnih uslova eksploatacije. Uticaji parametara poput mase tereta, nagiba puta i pređenog rastojanja na ukupne otpore kretanju i brzinu vozila, posebno su razmatrani. Prosečna greška modela iznosi oko 13%. Kalibracija modela izvršena je na osnovu putnih merenja.
Peng et. al., 2023.	Teretna vozila / Dizel	U okviru istraživanja ECM (Engine-based Correction Model) razvijen je model procene potrošnje goriva za različite režime rada motora vozila. Model je zasnovan na empirijskom pristupu izračunavanja potrošnje goriva na osnovu ulaznih parametra koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika motora, putnih i transportnih uslova eksploatacije. Prosečna greška modela iznosi oko 3%. Kalibracija je izvršena na osnovu više unakrsnih validacija sa podacima dobijenim putnim merenjima.
Lei et. al., 2024.	Teretna vozila / primenljivo na sve vrste pogonskih goriva	U okviru programa MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) razvijen je model za procenu izduvne emisije gasova za različite režime kretanja vozila, na osnovu ulaznih podataka koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, saobraćajnih, putnih, transportnih i klimatskih uslova eksploatacije. Izduvna emisija predstavlja funkcionalnu zavisnost između referentnih vredosti emisionih faktora, količine transportovane robe i dužine trase, odnosno njenih deonica. Prosečna greška modela iznosi oko 7%. Kalibracija modela izvršena je na osnovu podataka programa MOVES i podataka dobijenih putnim merenjima.

2.2 Pregled prethodnih istraživanja u oblasti unapređenja efikasnosti procesa drumskog transporta gasa

Prethodna istraživanja u oblasti unapređenja efikasnosti procesa transporta gasova, obuhvataju širok spektar pristupa, od modela zasnovanih na jednačinama stanja realnog gasa pomoću kojih se vrši simulacija procesa punjenja i pražnjenja posuda do metodologija za optimizaciju procesa skladištenja i transporta, i razvoja integrisanih sistema snabdevanja i distribucije gasa. U zavisnosti od primenjenog pristupa, u istraživanjima analiziraju se različiti

parametri, poput fizičko–hemijskih karakteristika gasa, radnih pritisaka, temperature, materijala izrade posuda, vremena potrebnog za punjenje i pražnjenje, opravdanosti primene, investicionih i operativnih troškova, iskorišćenja sistema i dr. Konceptualno, sa aspekta primene, razvijeni modeli i metodologije razmatraju pojedinačne posude ili ceo sistem, tj. skupove vozila sa nadgradnjama (Chen, Zheng, Xu, Li, Liu and Bie, 2010; Kunz, and Wagner, 2012; Elgowainy, Reddi, Sutherland and Joseck, 2014; Zheng, Zhang, Xu, Gu, Wu and Hou, 2016; Reddi et. al., 2018a; Reddi, Elgowainy, Rustagi and Gupta, 2018b; Deng et. al., 2018; Shirazi, Sarmad, Rostami, Moein, Zare and Mohammadbeigy, 2019; Fleischhacker, Shakibi Nia, Coll, Perwög, Schreiner, Burger, and Fleischhacker, E., 2023; Buschmann and Gallep, 2024; Bilgili and Yumşakdemir, 2024; Maltby, Aasen, Hammer and Wilhelmsen, 2025; Shin and Ha, 2024), prikazano u Tabeli 2.

Tabela 2. Pregled prethodnih istraživanja u oblasti unapređenja efikasnosti procesa transporta gasova

Istraživanje	Primena	Opis
Chen et. al., 2010; Zheng et. al., 2016.	Pojedinačne posude	U okviru istraživanja, kao doprinos načinima skladištenja i transporta vodonika, razvijeni su modeli sa kojim je moguće odrediti fizička i termodinamička svojstva gasa primenom jednačina koje opisuju realno stanje gasova. Modelima je moguće odrediti širok spektar svojstava, poput gustine, mase, pritiska, temperature, zapremine, unutrašnje energije, specifične entalpije i dr. Prosečna greška modela, u zavisnosti je od primenjene jednačine stanja realnog gasa i referentnih podataka nacionalnih standarda NIST (National Institute of Standards and Technology), i kreće se u opsegu od 1 do 4 %. Kalibracija modela izvršena je na osnovu podataka NIST.
Kunz, and Wagner, 2012; Maltby et. al., 2025.	Pojedinačne posude	U okviru istraživanja, kao doprinos načinima skladištenja i transporta, razvijeni su modeli sa kojim je moguće odrediti fizička i termodinamička svojstva ugljen–dioksida, prirodnog gasa i pratećih smeša gasova, na osnovu jednačina realnog stanja. Modelima je moguće odrediti širok spektar svojstava, poput gustine, mase, pritiska, temperature, zapremine i dr. Prosečne greške razvijenih modela, u zavisnosti su od primenjenih jednačina, i kreću se u opsegu od 1 do 3%. Kalibracija modela izvršena je na osnovu realnih merenja.
Bilgili and Yumşakdemir, 2024.	Pojedinačne posude	U okviru istraživanja, kao doprinos načinima skladištenja i transporta vodonika, razvijen je model za procenu vremena komprimovanja gasa. Model je zasnovan na eksploataciono–tehničkim karakteristikama posuda, hemijskih karakteristikama gasa i temperaturnim uslovima tokom punjenja i pražnjenja posuda. Tačnost modela u zavisnosti je od primenjenih jednačina stanja. Naime, za primenjene jednačine stanja realnog gasa prosečna greška modela iznosi oko 1% za Soave-Redlich-Kwong jednačinu, odnosno oko 6% za jednačinu Peng-Robinson. U slučaju primene jednačine stanja idealnog gasa, greška modela iznosi oko 24%. Kalibracija modela izvršena sa podacima realnih merenja i na osnovu ponovljenih simulacionih merenja.
Elgowainy et. al., 2014; Reddi et. al., 2018b.	Nadgradnje teretnih vozila	U istraživanjima su analizirane mogućnosti primene savremenih vozila i nadgradnji u svrhu unapređenja sistema skladištenja i distribucije vodonika na stanicama za snabdevanje gorivom. Analize su izvršene sa stanovišta eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, operativnih i investicionih troškova, primenom modela za optimizaciju rada stanica. Modelima, koji su zasnovani na jednačinama koje opisuju realno stanje gasa, moguće je izvršiti optimizaciju rada stanica za snabdevanje gorivom od mesta prijema gasa, vozila i nadgradnji, do mesta distribucije – komprimovanja gasa u rezervoare vozila. Doprinosi istraživanja ogledaju se kroz optimizaciju procesa rada stanica za snabdevanje gorivom, primenom savremenih vozila i nadgradnji izrađenih od kompozitnih materijala. Proces rada se ogleda kroz povećanje kapaciteta stanica uz istovremeno smanjenje operativnih troškova i vremena komprimovanja, tj. vremena zadržavanja na stanici.
Deng et. al., 2018.	Nadgradnje teretnih vozila	U radu, kao doprinos unapređenju transporta i skladištenja komprimovanog prirodnog gasa, analizirana su generacijska unapređenja nadgradnji teretnih vozila. Analiza je obuhvatila temperaturne uticaje kod dva tipa posuda, kod konvencionalnih posuda izrađenih od čelika Tip–1 i kod čeličnih posuda dodatno obloženih kompozitnim vlaknima Tip–2. Primenom razvijenog modela u radu, analizirani su temperaturni uticaji na ukupno vreme komprimovanja gasa. Razvijeni model, zasnovan na jednačinama stanja realnog gasa, koji primenom podataka o eksploataciono–tehničkim karakteristikama posuda, hemijskih karakteristikama gasa i temperaturnim uslovima tokom punjenja i pražnjenja, izračunava vreme komprimovanja, zadržavanja na mestu utovara robe. Posude Tip–2 iako imaju bolje eksploataciono–tehničke karakteristike, veće zapremine i radne pritiske, usled sporijeg hlađenja imaju duže vreme zadržavanja na mestu komprimovanja. Prosečna greška modela u poređenju sa realnim merenjima na stanicama za komprimovanje, iznosi oko 3%. Kalibracija modela izvršena je na osnovu realnih merenja.

Reddi et. al., 2018a; Shin and Ha, 2024.	Nadgradnje teretnih vozila	U radu prezentovano je istraživanje, kao deo programa Ministarstva za energetiku Sjedinjenih Američkih Država, koje se zasniva na analizi primene konvencionalnih čeličnih i savremenih kompozitnih nadgradnji teretnih vozila, u svrhu unapređenja sistema transporta, skladištenja i dalje distribucije vodonika i prirodnog gasa na stanicama za snabdevanje gorivom. Analiza je izvršena sa stanovišta eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, generacijskih unapređenja posuda, masenih iskorišćenja, troškova transporta i troškova nabavki nadgradnji. Metodologija je zasnovana na izračunavanju količina gasa po nadgradnji vozila u zavisnosti od materijala izrade, zapremine i radnog pritiska pri konstantnim temperaturnim uslovima, kao i određivanju troškova transporta na osnovu transportovane količine vodonika i primenjenog tipa nadgradnje. Doprinosi se ogledaju u definisanju metodologije za procenu i kvantifikovanje uticaja različitih eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, u odnosu na količine transportovanog gasa po nadgradnji.
Shirazi et. al., 2019; Fleischhacker et. al., 2023; Buschmann and Gallep, 2024.	Nadgradnje teretnih vozila	U istraživanjima, kao deo programa ekološki i ekonomski održive primene vodonika kao pogonskog goriva, predstavljene su metodologije koje razmatraju postupke proizvodnje, skladištenja, transporta i distribucije gasa krajnim korisnicima. Istraživanja razmatraju i preduslove za primenu MEGC *(engl. Multiple-element gas containers)* nadgradnji teretnih vozila, kao doprinose načinima transporta vodonika i kasnije distribucije, pre svega na stanicama za snabdevanje gorivom. Analize su izvršene sa stanovišta eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, opravdanosti primene, operativnih i investicionih troškova i dr. Kao doprinosi se izdvajaju postupci za uvođenje vodonika kako novog pogonskog energenta sa elementima koji uključuju postupke proizvodnje, transporta i distribucije, prvenstveno izdvajajući drumski načina transporta, primenom savremenih nadgradnji.

2.3 Zaključna razmatranja i predlozi za dalja unapređenja

Prethodna istraživanja u oblasti procene potrošnje goriva, izduvne emisije i njenih troškova (Barth et. al., 2005; Edwardes and Rakha, 2014; Dindarloo and Siami-Irdemoosa, 2016; Perrotta et. al., 2017; Fang et. al., 2019; Kan et. al., 2020; Pereira et. al., 2021; Katreddi and Thiruvengadam, 2021; Gong et. al., 2021; Alamdari et. al., 2022; Peng et. al., 2023; Lei et. al., 2024, Ivković i ostali, 2017b; 2018; 2019; Čokorilo i ostali, 2019; Weller et. al., 2019) obuhvataju postupke za analizu različitih paramatara koji doprinose unapređenju efikasnosti drumskog transporta pri različitim uslovima primene. S druge strane, analizom literature može se uočiti da dosadašnja istraživanja ne razmatraju specifičnosti transporta gasova i uticaje koji proističu od eksploataciono–tehničkih karakteristika nadgradnji, prvenstveno na masena iskorišćenja, potrošnju goriva, izduvnu emisiju i troškove emisije izduvnih gasova. Kod postojećih istraživanja, sa aspekta povećanja potrošnje goriva i izduvne emisije, parametri čiji se uticaji posebno izdvajaju su: tip pogonskog agregata, vrsta i kvalitet goriva, maseni parametri, aerodinamičke karakteristike, putni uslovi i način upravljanja vozilom, i dr. Nasuprot tome, kada je reč o unapređenju efikasnosti procesa skladištenja i transporta gasova, takođe u literaturi su prisutna brojna istraživanja koja se bave analizom relevantnih parametara u cilju unapređenja efikasnosti transporta, vozila i nadgradnji, kao i pojedinačnih posuda namenjenih za transport gasova (Chen et. al., 2010; Kunz, and Wagner, 2012; Elgowainy et. al., 2014; Zheng et. al., 2016; Reddi et. al., 2018a; Reddi et. al., 2018b; Deng et. al., 2018; Shirazi et. al., 2019; Fleischhacker et. al., 2023; Buschmann and Gallep, 2024; Bilgili and Yumşakdemir, 2024; Maltby et. al., 2025; Shin and Ha, 2024). Međutim, tematika drumskog transporta gasova i dalje je nedovoljno obrađena. Dosadašnja istraživanja nisu usmerena ka razvoju jedinstvenog modela za procenu količine gasa po vozilu ili potrebnih zapreminskih kapaciteta za realizaciju određenog transportnog zadatka. Naime, značajan broj istraživanja obrađuje pojedinačne aspekte koji utiču na ukupnu efikasnost pojedinačnih posuda ili vozila i nadgradnji, prvenstveno u odnosu na generacijska unapređenja posuda koja se odnose na eksploataciono–tehničke karakteristike i materijale izrade.

3. Savremeni načini transporta prirodnog gasa u funkciji boljeg i efikasnijeg snabdevanja tržišta

Uzimajući u obzir prethodno opisane motive istraživanja, pre svega, pomenute uticaje koji potiču od geopolitičkih, ekonomskih, tehnoloških i ekoloških aspekata, a koji dovode do diverzifikacije izvora prirodnog gasa, može se zaključiti da snabdevanje tržišta prirodnim gasom predstavlja složen proces. Stoga je, u svrhu efikasnijeg snabdevanja krajnjih korisnika, neophodno sagledavanje svih uticajnih aspekata u cilju obezbeđivanja energetski, ekonomski i ekološki održivih rešenja. Posmatrano sa geopolitičkog aspekta opredeljenost i usmeravanje tržišta ka određenim energetskim izvorima ali i načinima transporta energenata, prvenstveno se ogleda kroz usaglašavanja energetskog sektora sa spoljnopolitičkim ciljevima država ili regiona, uz obezbeđivanje dovoljnih količina energenata za funkcionisanje privrede i društva. Nasuprot navedenom, sa ekonomskog aspekta opredeljenost i usmeravanje tržišta ka novim izvorima snabdevanja podrazumeva sveobuhvatne analize održivosti i isplativosti takvih odluka. Prethodno navedeno prvenstveno uključuje preispitivanje troškova koji prate proces usaglašavanja, poput investicionih ulaganja, proizvodnje i prerade, transporta i skladištenja, zatim poreza i poreskih olakšica za primenu ekoloških prihvatljivijih energenata, ali i nastojanju da se obezbede stabilne cene u dužem vremenskom periodu i dr. S druge strane tehnološki aspekt usko je povezan sa napretkom i trenutnim razvojem privrede i kao takav predstavlja ključni segment prilikom definisanja opredeljenosti tržišta ka određenim izvorima snabdevanja ali i načinima transporta. Pre svega, potrebno je razmotriti raspoloživost odgovarajuće infrastrukture koja omogućava kontinuirani transport i skladištenje, mogućnost prerade ukoliko to zahtevaju tehnološki procesi, zastupljenost energenta u privredi, kao i mogućnost primene novih tehnologija i materijala i dr. Sa stanovišta ekologije i zaštite životne sredine, kroz brojne međunarodne ali i nacionalne propise definisani su obavezni zahtevi koji se moraju ispunjavati u cilju dekarbonizacije i smanjenja zagađenja privrede u celini. S tim u vezi, prilikom donošenja odluka o usmeravanju tržišta ka određenim energetskim izvorima ali i načinima transporta i distribucije prirodnog gasa ka krajnjim korisnicima, potrebno je razmatrati sve uticajne aspekte. Međutim. u realnim okolnostima, usmeravanje tržišta, izbor načina transporta i distribucije prirodnog gasa najčešće predstavlja kompromisno rešenje navedenih uticaja.

U skladu sa navedenim, u nastavku rada navešće se najčešći načini transporta i distribucije prirodnog gasa. Izbor načina transporta prvenstveno zavisi od agregatnog stanja prirodnog gasa. Savremeni načini transporta obuhvataju transport putem gasovodne infrastrukture, pomorski i rečni transport, kao i železnički i drumski transport. Najzastupljeniji je transport prirodnog gasa u gasovitom stanju putem gasovodne mreže. Kao takav prirodni gas se putem gasovodne mreže transportuje cevovodima od mesta proizvodnje ili izvora snabdevanja do skladišta, nakon čega se gas distributivnom mrežom manjih kapaciteta distribuira do krajnjih korisnika. Osnovne prednosti primene gasovodne mreže ogledaju se kroz mogućnosti kontinuirane isporuke velikih količina gasa na velike udaljenosti, kao i najniži troškovi transporta po kubnom metru i relativno niski troškovi održavanja tokom projektovanog radnog veka. Bitno je naglasiti da navedeni troškovi ipak predstavljaju zavisnost geopolitičkog uticaja. Takođe, odlike gasovoda su i visoka bezbednost, prvenstveno kod podzemnih izvođenja, čime se smanjuje se rizik od požara i po zdravlje ljudi i okoline. S druge strane, kao ograničenja navode se zavisnost od konfiguracije terena, veoma visoka početna investiciona ulaganja ali i relativno niska fleksibilnost distribucije u poređenju sa drumskim transportom (Speight, 2018; Kidnay et. al 2019; Mićić, 2020; Van Heerden and Putter, 2021).

Kako je prethodno pomenuto, tehnologija transporta prirodnog gasa u zavisnosti je od agregatnog stanja u kom se gas nalazi tokom transporta (gasovito, tečno ili čvrsto stanje), a postupak transporta i distribucije do krajnjih korisnika moguće je sprovesti sa nekim od načina transporta, prikazano na Slici 1.



(Izvori: LibreTexts; IMT Design; CTIF – International Association of Fire and Rescue Services; Owner Team Consult; State of Arkansas; Official government portal; SQLearn e-Learning; Maritime Training Academy; Bulgarian Maritime Training Centre;)

Slika 1. Savremeni načini transporta prirodnog gasa

U okviru analiziranih načina transporta, pored gasovodne infrastrukture, prirodni gas je moguće transportovati i alternativnim vidovima, poput pomorskog, rečnog, železničkog i drumskog transporta, a koji uključuju tehnologije fizičko–hemijskih transformacija gasa. U funkciji fizičko–hemijskih karakteristika, najznačajnije transformacije prirodnog gasa su: komprimovanje prirodnog gasa KPG *(engl. Compressed Natural Gas)*, utečnjavanje prirodnog gasa UPG *(engl. Liquefied Natural Gas)* i prevođenje u čvrsto stanje prirodnog gasa *(engl. Gas–to–solid)* (Speight, 2018; Kidnay et. al 2019; Mićić, 2020; Van Heerden and Putter, 2021).

Tehnologija transporta i skladištenja prirodnog gasa u komprimovanom stanju, zasniva se na primeni kompresorskih stanica i cilindričnih bešavnih posuda pod pritiskom, izrađenih od visoko kvalitetnih metalnih ili kompozitnih materijala na visokim pritiscima od 20 do 25 MPa. Komprimovani prirodni gas se skladišti i transportuje u svežnjevima boca–posuda, gasnim kontejnerima sa više elemenata MEGC *(engl. Multiple-element gas containers)* ili baterijskim vozilima (nadgradnjama), ostvarujući kompaktnu celinu (koja uključuje sistem spojnih cevi, sigurnosnih uređaja, mernih instrumenta, uređaja za punjenje i pražnjenje i dr.).

Transport i skladištenje prirodnog gasa u tečnom stanju zasniva se na primeni tehnologija, koje na izrazito niskim temperaturama od oko –162 °C gas prevode u tečno stanje, nakon čega se primenom pumpi i kriogenih posuda (cisterni), izrađenih od visoko kvalitetnih metalnih materijala, skladišti i transportuje na pritiscima od oko 1,6 MPa. Kriogene posude predstavljaju termički izolovane posude pod pritiskom (koje uključuju termoizolacione elemente, sigurnosne uređaje, merne instrumente, uređaje za punjenje i pražnjenje i dr.), projektovane za skladištenje i transport kriogenih fluida (poput prirodnog gasa, kiseonika, azota, i dr.) u tečnom stanju na izrazito niskim temperaturama. Konstruktivna izvođenja kriogenih posuda (posuda u posudi)

su takva da se kao izolacioni materijali između zidova koristi vakuum i termoizolacija, čime se omogućava dugotrajno skladištenje uz minimalna isparavanje (Speight, 2018; Kidnay et. al 2019; Mićić, 2020; Van Heerden and Putter, 2021; Martínez, 2025). Osnovne razlike u odnosu na tehnologiju transporta u komprimovanom stanju su: način skladištenja i transporta, kao i radni uslovi. KPG se skladišti u svežnjevima boca–posuda, MEGC ili baterijskim nadgradnjama na izrazito visokim pritiscima i ambijentalnim temperaturama. S druge strane, UPG se skladišti u kriogenim posudama (cisternama) na izrazito niskim temperaturama i relativno niskim pritiscima. Odlike tehnologije transporta u tečnom stanju su mogućnost transporta većih količina gasa, rad na nižim pritiscima i sa posudama većih zapremina. Nasuprot navedenom, kao osnovni nedostak navodi se složenost održavanja i upotreba kriogenih posuda, pre svega kroz primenu tehnologija pothlađivanja koje prate proces skladištenja i transporta, ali i tehnologija kasnijeg isparavanja i dalje distribucije. Navedeno posebno treba razmatrati, prvenstveno u kontekstu funkcionalne primenljivosti tehnologije u odnosu na trenutni nivo razvoja privrede. Takođe, kod kriogenih rezervoara prisutan je rizik od curenja, jer izgradnja uključuje postupke zavarivanja, što nije slučaj kod cilindričnih bešavnih posuda pod pritiskom.

Pored navedenih, prisutna je fizičko–hemijska transformacija prirodnog gasa, prevođenje u čvrsto stanje. Tehnologija se zasniva na mešanju gasa sa vodom u kontrolisanim uslovima na temperaturama od 2–10 °C, nakon čega se u termoizolacionim kontejnerima hladi i prevodi u čvrsto stanje na temperaturama od oko –15 °C i pritiscima od 0,1–1 MPa. Osnovne razlike u odnosu na tehnologiju transporta u komprimovanom i tečnom stanju je način skladištenja, transporta i radni uslovi. Prirodni gas u čvrstom stanju skladišti se u namenski izrađenim termoizolacionim kontejnerima na niskim temperaturama i pritiscima (Speight, 2018; Kidnay et. al 2019; Mićić, 2020; Martínez, 2025). Prednosti tehnologije transporta gasa u čvrstom stanju u odnosu na tehnologije komprimovanja i utečnjavanja, je smanjenje rizika od požara tokom procesa transporta i niži radni pritisci, kao i mogućnost transporta veće količine gasa u odnosu na tehnologiju komprimovanja. S druge strane, kao osnovni nedostaci navode se tehnološki procesi koji prate prevođenje gasa iz čvrstog stanja, tehnologija kasnijeg isparavanja i dalje distribucije, kao i mala zastupljenost tehnologije (Speight, 2018; Kidnay et. al 2019; Van Heerden and Putter, 2021).

Polazeći od prethodno navedenog, u Tabeli 3., dat je sažet pregled zavisnosti agregatnog stanja u kom se gas nalazi i načina transporta prirodnog gasa, tj. odgovarajućih tehničkih rešenja.

Tabela 3. Načini transporta prirodnog gasa

Način transporta / agregatno stanja	Gasovito	Tečno	Čvrsto
Gasovod	Magistralni/distributivni gasovodi	Distributivni gasovodi, manjih kapaciteta	N.P
Pomorski/rečni transport	MEGC kontejneri/ baterijske nadgradnje	Kriogeni rezervoari/posude	Termoizolacioni kontejneri
Železnički transport	MEGC kontejneri/ baterijske nadgradnje	Kriogene cisterne/posude	Termoizolacioni kontejneri
Drumski transport	MEGC kontejneri/ baterijska vozila	Kriogene cisterne/posude	Termoizolacioni kontejneri

N.P – Nije primenljivo.
Izvor:
[1] Speight. 2018. Natural gas: a basic handbook (Eds. 2);
[2] LibreTexts. https://chem.libretexts.org/;
[3] IMT Design. https://imt.design/en/;
[4] CTIF – International Association of Fire and Rescue Services. https://ctif.org/;
[5] Owner Team Consult. https://www.ownerteamconsult.com/;
[6] State of Arkansas. Official government portal. https://portal.arkansas.gov/;
[7] SQLearn e-Learning. https://www.sqlearn.com/;
[8] Maritime Training Academy. https://maritimetrainingacademy.com/;
[9] Bulgarian Maritime Training Centre. https://bmtc.bg/en/.

Naime, Tabelom 3. sistematizovan je odnos između agregatnog stanja gasa, tehnologije i načina transporta. Polazeći od uvodnih razmatranja ovog rada i u uslovima ograničene razvijenosti infrastrukture, što je posebno izraženo kod država sa nedovoljno razvijenom privredom, izbor načina transporta gasa uslovljen je brojnim faktorima. Najznačajniji faktori primarno potiču od ekonomske moći, geografskog položaja i trenutnog razvoja privrede države, poput investicionih ulaganja, dostupnosti infrastrukture, prostorne raspoređenosti i međusobne povezanosti skladišta, raspoloživosti voznih resursa i dr. Takođe, pored navedenog, značajan uticaj na izbor načina i tehnologije transporta imaju funkcionalna primenljivost tehnologije i fleksibilnost transporta u odnosu na trenutni razvoj privrede.

U Tabeli 4., prikazana je komparativna analiza između načina transporta prirodnog gasa i odgovarajućih tehničkih rešenja koja se primenjuju u svetu, u odnosu na parametare količine transportovanog gasa, investicionih ulaganja, fleksibilnosti transporta i funkcionalne primenljivost tehnologije. Tabela sistematizuje odnos između tehnologije i načina transporta prirodnog gasa sa delom parametara koji mogu doprineti odlukama o izboru tehnologije i načinu transporta.

Tabela 4. Komparativna analiza između načina i tehnologije transporta prirodnog gasa

Količina transportovanog gasa			
Drumski transport < Železnički transport < Pomorski/rečni transport < Gasovod			
Investiciona ulaganja u infrastrukturu			
Drumski transport < Železnički transport < Pomorski/rečni transport ~ Gasovod			
Fleksibilnost transporta			
Pomorski/rečni transport < Železnički transport < Gasovod ~ Drumski transport			
Funkcionalna primenljivost tehnologije			
Način transporta/agregatno stanje	Čvrsto	Tečno	Gasovito
	Čvrsto < Tečno < Gasovito		
Gasovod	Nije primenljivo	Distributivni gasovodi – ograničena primena	Magistralni i distributivni gasovodi – primenljivo
Pomorski/rečni transport	Termoizolacioni kontejneri – ograničena primena	Kriogeni rezervoari/posude – primenljivo	MEGC kontejneri/ Baterijska nadgradnje – ograničena primena
Železnički transport	Termoizolacioni kontejneri – ograničena primena	Kriogene cisterne/posude – primenljivo	MEGC kontejneri/ baterijske nadgradnje – primenljivo
Drumski transport	Termoizolacioni kontejneri – ograničena primena	Kriogene cisterne/posude – primenljivo	MEGC kontejneri/ baterijske nadgradnje – primenljivo
Najzastupljenije tehnologije transporta			
Pomorski/rečni transport	Termoizolacioni kontejneri < MEGC kontejneri/baterijske nadgradnje < Kriogeni rezervoari		
Železnički transport	Termoizolacioni kontejneri < MEGC kontejneri/baterijske nadgradnje ≤ Kriogene cisterne		
Drumski transport	Termoizolacioni kontejneri < MEGC kontejneri/baterijska vozila ≤ Kriogene cisterne		

Izvor:
[1] Speight. 2018. Natural gas: a basic handbook (Eds. 2);
[2] Kidnay et. al., 2019. Fundamentals of natural gas processing.;
[3] Van Heerden and Putter. 2021. Alternative Modes of Natural Gas Transport;
[4] LibreTexts. https://chem.libretexts.org/;
[5] IMT Design. https://imt.design/en/;
[6] CTIF – International Association of Fire and Rescue Services. https://ctif.org/;
[7] Owner Team Consult. https://www.ownerteamconsult.com/;
[8] State of Arkansas. Official government portal. https://portal.arkansas.gov/;
[9] SQLearn e-Learning. https://www.sqlearn.com/;
[10] Maritime Training Academy. https://maritimetrainingacademy.com/;
[11] Bulgarian Maritime Training Centre. https://bmtc.bg/en/.

Bitno je naglasiti da je navedena komparativna analiza uslovnog (opšteg) karaktera i da je zasnovana na tipičnim karakteristikama koje odgovaraju načinu i primenjenoj tehnologiji transporta prirodnog gasa, i može varirati u zavisnosti od parametara koji potiču od geopolitičkih, ekonomskih, tehnoloških i ekoloških aspekata.

U pogledu količina transportovanog gasa, najveće transportne kapacitete i kontinuiranu isporuku ostvaruju gasovodi, zatim slede pomorski, rečni i železnički transport, dok najmanje transportne kapacitete ostvaruje drumski transport gasa. Kako je navedeno, gasovodi omogućuju kontinuiranu isporuku velikih količina gasa na velike udaljenosti ali i najniže troškove transporta po kubnom metru u odnosu na ostale načine transporta. Zatim slede pomorski i rečni transport koji omogućavaju isporuku značajnih količina gasa na velike udaljenosti, dok su železnički i drumski namenjeni za transport manjih količina gasa na srednje i male udaljenost. Posmatrano sa aspekta investicionih ulaganja u infrastrukturu, najveća ulaganja prate izgradnju gasovoda i distributivnih mreža. Pored navedenog, bitno je napomenuti da velika ulaganja ima i pomorski vid transporta, sa naglaskom da u određenim situacijama ulaganja mogu biti viša od početnih ulaganja za izgradnju gasovoda. Prvenstveno, navedena ulaganja predstavljaju zavisnost od geopolitičkih uticaja ali i geografskog položaja država, i odnose se na izgradnju luka, terminala, postrojenja za naknadni tretman gasa, voznih resursa–brodova i dr. Zatim sledi železnički transport, koji odlikuju visoka početna ulaganja, pre svega u železničku infrastrukturu i distributivne kapacitete, i na kraju drumski transport koji ima najniža investiciona ulaganja ali i najmanju efikasnost u pogledu količina transportovanog gasa. S druge strane, fleksibilnost transporta i funkcionalna primenljivost tehnologije od posebnog je značaja u uslovima ograničene razvijenosti infrastrukture. Posmatrano sa aspekta fleksibilnosti transporta, pomorski i rečni transport odlikuje najmanja fleksibilnost, koja je u zavisnosti od luka, terminala, prohodnosti plovnih puteva i dr. Železnički transport pruža veći stepen fleksibilnosti u odnosu na pomorski i rečni transport, ali je uslovljen razvijenošću železničke infrastrukture i naknadnih distributivnih kapaciteta do krajnjih potrošača. Za razliku od toga, drumski transport i u određenim uslovima distributivni gasovod, obezbeđuju najveću fleksibilnost u distribuciji prirodnog gasa do krajnjih potrošača. Fleksibilnost gasovoda u neposrednoj vezi sa razvijenošću distributivne mreže, koja direktno utiče na fleksibilnost, omogućavajući povezanost i kontinuirano snabdevanja krajnjih potrošača. Nasuprot tome, razvijenost gasovodne infrastrukture u direktnoj je zavisnosti od ekonomske moći i geografskog položaja države. Kao alternativa prethodno navedenom, u pogledu fleksibilnosti, proizilazi drumski transport. Naime, drumski transport omogućava veći stepen prilagođavanja uslovima gde trenutni tehnološki kapaciteti ili zakonski okviri onemogućuju razvoj mreže gasovoda, luka, terminala ili železničke infrastrukture, a gde je potrebna brza i precizna distribucija gasa u skladu sa zahtevima krajnjih potrošača.

U pogledu funkcionalne primenljivosti tehnologije, sa aspekta fizičko–hemijskih transformacija prirodnog gasa, trenutno u svetu su najzastupljenije tehnologije transporta u gasovitom i tečnom stanju, dok najmanju zastupljenost ima tehnologija prevođenja gasa u čvrsto stanje. Posmatrano sa aspekta načina i tehnologije transporta prirodnog gasa, osim mreže gasovoda, najzastupljeniji način i tehnologije transporta gasa su u tečnom stanju, zasnovane na kriogenim sfernim rezervoarima, primenom pomorskog ili rečnog transporta. Pored navedenog, u ograničenoj primeni, prisutna su i tehnička rešenja za transport gasa u komprimovanom stanju, odnosno primenom MEGC kontejnera i baterijskih nadgradnji. Redosled zastupljenosti tehnologija kod železničkog i drumskog transporta, u zavisnosti je od tržišta i razvijenosti infrastrukture, tj. pre svega ekonomskog i tehnološkog razvoja države.

S tim u vezi, u svetu su najzastupljenije tehnologije transporta u gasovitom i tečnom stanju, primenom MEGC kontejnera, baterijskih nadgradnji ili kriogenih cisterni – posuda. Transport i distribucija gasa primenom kriogenih cisterni, iako predstavlja tehnološko unapređenje u odnosu na tehnologiju komprimovanja sa aspekta transporta većih količina gasa, uslovljen je razvijenošću infrastrukture i privrede u celini, kao i svim specifičnostima koje prate datu tehnologiju.

Polazeći od prethodno navedenog, za slučaj Republike Srbije, u Tabeli 5. prikazano je komparativno poređenje najzastupljenijih tehnologija u drumskom transportu prirodnog gasa. Poređenje je izvršeno u odnosu na parametare količine transportovnog gasa po vožnji, investiciona ulaganja, fleksibilnost transporta i funkcionalnu primenljivost tehnologije u odnosu na trenutni razvoj infrastrukture. Tabela 5. sistematizuje odnos između tehnologija drumskog transporta prirodnog gasa sa delom parametara koji mogu doprinoti odlukama izbora tehnologije u uslovima ograničene razvijenosti infrastrukture.

Tabela 5. Komparativna analiza između načina i tehnologija drumskog transporta prirodnog gasa

Agregatno stanje	Gasovito – Tečno
Količina transportovanog gasa	MEGC kontejneri/baterijska vozila < Kriogene cisterne
Investiciona ulaganja u infrastrukturu	MEGC kontejneri/baterijska vozila ≤ Kriogene cisterne
Fleksibilnost transporta	MEGC kontejneri/baterijska vozila = Kriogene cisterne
Funkcionalna primenljivost tehnologije	MEGC kontejneri/baterijska vozila > Kriogene cisterne

Izvor:
[1] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine;
[2] Integrisani nacionalni energetski i klimatski plan republike Srbije za period do 2030. sa vizijom do 2050. godine;
[3] Van Heerden and Putter. 2021. Alternative Modes of Natural Gas Transport;
[4] Kidnay et. al., 2019. Fundamentals of natural gas processing;
[5] Speight. 2018. Natural gas: a basic handbook (Eds. 2).

Uzimajući u obzir prethodno navedeno, u pogledu funkcionalne primenljivosti tehnologije, sa aspekta fizičko–hemijskih transformacija, transport prirodnog gasa u tečnom stanju primenom kriogenih cisterni, iako unapređuje efikasnost drumskog trasnporta boljim masenim iskorišćenjima i transportom većih količina gasa po vožnji, uslovljen je ekonomskim i tehnološkim razvojem države. Naime, ekonomski i tehnološki razvoj prvenstveno se ogleda u pogledu razvijenosti potrebne infrastrukture za skladištenje i distribuciju gasa u tečnom stanju, ali i privrednih sektora kao krajnjih korisnika, tj. raspoloživošću potrebne infrastrukture za prihvat i manipulaciju gasa, pre svega kao pogonskog energenta. Osim navedenog, kao ograničenja ističu se složenost održavanja kriogenih posuda, kao i tehnologija utečnjavanja i kasnijeg prevođenja u gasovito stanje, a koje prate procese skladištenja i transporta. Za razliku od procesa utečnjavanja, tehnologiju komprimovanja koju prati proces skladištenja i transporta primenom MEGC nadgradnji i baterijskih vozila, moguće je uz odgovarajuća prilagođavanja primeniti na postojeću infrastrukturu.

Nadovezujući se na prethodno izneto, sa aspekta investicionih ulaganja u infrastrukturu, primena tehnologije transporta prirodnog gasa u tečnom stanju izistkuje veća početna ulaganja, koja su praćena tehnološkim procesima utečnjavanja i kasnijim prevođenjima u gasovito stanje. U pogledu investicionih ulaganja u vozila i nadgradnje, sutuacija se u određenim slučajevima izjednačava. Naime, kada se uporede troškovi nabavke vozila cisterni opremljenih sa kriogenim posudama naspram vozila opremljenih sa posudama pod pritiskom izrađenim od savremenih kompozitnih materija, razlike u troškovima su male. Bitno je napomenuti da se situacija troškova nabavke osetno menja u korist vozila opremljenih sa starijim generacijskim rešenjima posudama pod pritiskom, izrađenim od metalnih materija. Posmatrano iz ugla fleksibilnosti transporta primenjena rešenja transporta gasa u tečnom i gasovitom stanju su izjednačena. Drugim rečima, sa vozilima i nadgradnjama opremljenim MEGC kontejnerima, baterijskim nadgradnjama ili kriogenim cisternama, moguće je realizovati brzu i preciznu distribuciju gasa do krajnjih potrošača, poput snabdevanja udaljenih industrijskh zona, ruralnih zajednica, stanica za snabdevanje gorivom i dr.

3.1 Konstrukciona rešenja vozila i nadgradnji namenjenih za transport komprimovanog prirodnog gasa

Vozila za prevoz opasnih materija, pored uspostavljenih okvira koji se odnose na novoproizvedena motorna i priključna vozila, kao i njihove sisteme i komponente sadržane u Direktivi (2007/46 EC) i nadovezujućoj Uredbi (2018/858 EC), moraju da zadovolje i dodatne specifične zahteve sadržane u Sporazumu (ECE 352) i nadovezujućim pravilnicima, poput Pravilnika o jednoobraznim odredbama za odobrenje vozila namenjenih za transport opasnih materija u pogledu konstruktivnih karakteristika (ECE R105).

Opasne materije su sve materije koje u postupcima proizvodnje, transporta ili manipulacije na mestima utovara i istovara, nesavesnim ili nestručnim rukovanjem, mogu izazvati opasnost po zdravlje ljude i okoline. Opasna materija koja se transportuje u odgovarajućem transportnom sredstvu (vozilu cisterni, baterijskom vozilu–nadgradnji, MEGC nadgradnji, demontažnoj cisterni, prenosivoj cisterni i dr.) ili odgovarajućoj ambalaži (kontejneru, buretu i dr.), predstavlja opasnu robu (Krstić, 2009).

Opasne materije u zavisnosti od fizičko–hemijskih svojstava, agregatnog stanja u kom se transportuju i stepena opasnosti, prvobitno su klasifikovane u 9 klasa i podklasa. Međutim stalnim unapređenjima Sporazuma (ECE 352), taj broj je porastao na 13 različitih klasa i podklasa. U datom kontekstu, klase obuhvataju eksplozivne materije i predmete, zatim gasove, zapaljive tečne materije, zapaljive čvrste materije, samoreagujuće materije, materije podložne polimerizaciji, samozapaljive materije, materije koje u dodiru sa vodom reaguju i razvijaju zapaljive gasove, oksidirajuće materije, organske perokside, otrovne materije, zarazne materije, radioaktivne materije, nagrizajuće materije i ostale opasne materije koje nisu svrstane u neku od prethodnih podela – klasa. Slednom navedenog, opasne materije koje pripadaju klasi 2, obuhvataju gasove i njihove smeše, koje se pri standardnom pritisku i temperaturi 20 °C nalaze u potpuno gasovitom stanju ili na 50 °C imaju pritisak pare preko 0,3 MPa, i podeljene su na:

- Komprimovane gasove, gasovi koji se pod pritiskom u ambalaži nalaze u gasovitom stanju i čija je kritična temperatura do –50 °C;
- Utečnjene gasove, gasovi koji se pod pritiskom u ambalaži nalaze u delimično tečnom stanju i čija je kritična temperatura niža od –50 °C, odnosno gasovi koji se na visokom pritisku prevode u tečno stanje na temperaturama od –50 °C do + 65 °C, ili gasovi koji se na niskom pritisku prevode u tečno stanje na temperaturama iznad + 65 °C;
- Duboko rashlađene gasove, gasovi koji se na izrazito niskim temperaturama u ambalaži nalaze u delimično tečnom stanju;
- Rastvorene gasove, gasovi koji se pod pritiskom u ambalaži nalaze rastvoreni u tečnom rastvaraču;
- Aerosolni raspršivači;
- Ostali gasovi koji nisu pod pritiskom, a koji podležu posebnim zahtevima tokom transporta.

Gasovi i njihove smeše, dodatno se razvrstavaju na grupe opasnosti u zavisnosti od stepena rizika, i to na: A – zagušujuće, O – oksidirajuće, F – zapaljive, T – otrovne, odnosno ukoliko gasovi imaju više svojstava opasnosti na TF – otrovne i zapaljive, TO – otrovne i oksidirajuće, TC – otrovne i korozivne, TFC – otrovne, zapaljive i korozivne, TOC – otrovne, oksidirajuće i korozivne.

Polazeći od navedenog, u zavisnosti od osobina opasne materije koja se transportuje, posebno su definisani zahtevi koji se odnose na transport i manipulacije na mestima utovara i istovara, kao i tehnički zahtevi za konstrukciju i odobrenje tipa vozila i zahtevi za konstrukciju i odobrenje tipa nadgradnji. Navedeni zahtevi, obuhvaćeni su brojnim nacionalnim i međunarodnim propsima, poput: Zakona o transportu opasne robe ("Sl. glasnik RS", br. 104/16, 83/18, 95/18 - dr. zakon i 10/19); Zakona o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti ("Sl. glasnik RS", br. 49/21); Uredbi o pokretnoj opremi pod pritiskom ("Sl. glasnik RS", br. 120/17); Pravilniku o načinu i postupku izdavanja adr sertifikata o odobrenju za vozilo ("Sl. glasnik RS", br. 1/24) i dr.; Zatim Sporazumu (ECE 352) i podržanim direktivama i pravilnicima, poput Direktive (2008/68 EC) o kopnenom transportu opasne robe; Direktive (2022/1999 EC) o kontroli drumskog transpora opasne robe; Direktivi (2010/35 EC) o pokretnoj opremi pod pritiskom; Pravilnika (ECE R105) i dr.

Zahtevi koji se odnose na nadgradnje (cisterne, baterijska vozila, MEGC nadgradnje, demontažne cisterne, prenosive cisterne i dr.), a koji se moraju ispuniti da bi transport opasne materije bio dozvoljen, dati su u odnosu na slovnobrojčanu oznaku ili kod cisterne *(engl. Tank Code)*. U zavisnosti od fizičko–hemijskih svojstava opasne materije i njenog identifikacionog UN broja, u Tabeli A Sporazuma (ECE 352), definisana su pravila za transport i manipulaciju, kao i posebne odredbe koje obuhvataju radnje na mestima utovara i istovara. Pravila za transport određene opasne materije data su u odnosu na oznaku vozila prema nameni, dato u delu devet Sporazuma, i slovnobrojčanu oznaku nadgradnje (kod cisterne). Drugim rečima, u Tabeli A navedene su oznake vozila prema nameni, odnosno vozila koja se smeju koristiti za transport određene opasne materije sa određenom nadgradnjom (slovnobrojčanu oznaku). Takođe, u Sporazumu su detaljno definisani i opšti zahtevi koji se moraju ispuniti, a koji se odnose na izradu nadgradnji, opremu, odobrenje tipa, ispitivanja, obeležavanja, upotrebu i dr. Slovnobrojčane oznake (kodiranje) i hijerarhija nadgradnji (cisterni) namenjenih za transport gasova, navedeni su u Tabeli 6., sastoje se od četiri dela sa kojima se tačno definiše primena nadgradnji na osnovu tipa i tehničkih karakteristika. Navedenim oznakama definisan je tip nadgradnje, proračunski pritisak, broj i položaj otvora za punjenje i pražnjenje, kao i prisutnost sigurnosnih ventila.

Tabela 6. Slovnobrojčane oznake i hijerarhija nadgradnji namenjenih za transport gasova

Deo slovnobrojčane oznake (koda)		Opis/Primena
Tip cisterne, baterijskog vozila ili MEGC nadgradnje	C	Cisterna, baterijsko vozilo ili MEGC, za komprimovane gasove;
	P	Cisterna, baterijsko vozilo ili MEGC, za utečnjene ili rastvorene gasove;
	R	Cisterna za duboko rashlađene gasove;
Proračunski pritisak	X	Odgovarajuća vrednost najmanjeg ispitnog pritiska u barima;
	22	Najmanji proračunski pritisak u barima;
Otvori za punjenje i pražnjenje	B	Cisterna sa otvorima za punjenje ili pražnjenje na dnu sa tri zatvarača; ili baterijsko vozilo ili MEGC nadgradnja sa otvorima ispod nivoa tečnosti ili za komprimovane gasove;
	C	Cisterna sa otvorima za punjenje ili pražnjenje na vrhu sa tri zatvarača, a ispod nivoa tečnosti opremljena je otvorima za čišćenje;
	D	Cisterna sa otvorima za punjenje ili pražnjenje na vrhu sa tri zatvarača, ili baterijsko vozilo ili MEGC nadgradnja без otvora ispod nivoa tečnosti;
Sigurnosni ventil	N	Cisterna, baterijsko vozilo ili MEGC nadgradnja koja nije hermetički zatvorena i koja je opremljena sa sigurnosnim ventilom;
	H	Cisterna, baterijsko vozilo ili MEGC nadgradnja koja je hermetički zatvorena.
Oznaka (M) iza kodne oznake označava da se opasna materija može transportovati i u baterijskim vozilima ili MEGC nadgradnjama.		
Hijerarhija nadgradnji namenjenih za transport gasova		
Slovnobrojčana oznaka (kod)	Drugi kodovi koji su dozvoljeni za datu oznaku (kod)	

C*BN	C#BN, C#CN, C#DN, C#BH, C#CH i C#DH
C*BH	C#BH C#BH, C#CH i C#DH
C*CN	C#CN, C#DN, C#CH i C#DH
C*CH	C#CH i C#DH
C*DN	C#DN i C#DH
C*DH	C#DH
P*BN	P#BN, P#CN, P#DN, P#BH i P#DH
P*BH	P#BH, P#CH i P#DH
P*CN	P#CN, P#DN, P#CH i P#DH
P*CH	P#CH i P#DH
P*DN	PC#DN i P#DH
P*DH	P#DH
R*BN	R#BN, R#CN i R#DN
R*CN	R#CN i R#DN
R*DN	R#DN

Izvor:
[1] Međunarodni sporazum o drumskom transportu opasne robe, izdanje 2023 i 2025 (ECE/326 i 352).

Oznaka za proračunski pritisak (#) u drugoj koloni koja se odnosi na dozvoljene kodove, mora da bude ista ili veća od oznake (*).

Zahtevi koji se odnose na konstrukciju i odobrenje tipa vozila, definisani su u poglavlju devet Sporazuma (ECE 352) i Pravlinika (ECE R105). Podela vozila prema nameni, odnosno klasifikacija u zavisnosti od obaveznih zahteva po pitanju tehničkih karakteristika koje vozila moraju zadovoljavati da bi se koristila za transport određenih opasnih materija, takođe je data slovnobrojčanom oznakom (MEMU/EXII/EXIII/FL i AT) u delu devet Sporazuma. Navedena podela definiše zavisnosti tehničkih karakteristika vozila od osobina i minimalnih količina opasne materije koja se transportuje. Transport opasne robe u cisternama, baterijskim vozilima, MEGC nadgradnjama, demontažnim cisternama, prenosivim cisternama i dr., obavlja se sa vozilima oznake FL i AT.

- Oznaka FL–predstavlja vozila namenjena za prevoz zapaljivih gasova u cisternama, baterijskim vozilima i demontažnim cisternama sa zapreminom većom od 1000 l ili gasnim kontejnerima MEGC, kontejner cisternama i prenosivim cisternama sa zapreminom većom od 3000 l. Takođe, FL oznaka predstavlja vozila namenjena za prevoz zapaljivih tečnih materija sa tačkom paljenja najviše od 60 °C (sa izuzetkom dizel goriva, ulja za loženje i gasnog ulja označenih sa slovnobrojčanom oznakom UN 1202) u vozilima cisternama ili demontažnim cisternama sa zapreminom većom od 1000 l, odnosno kontejner ili prenosivim cisternama sa zapreminom većom od 3000 l.

- Oznaka AT–predstavlja vozila koja ne pripadaju vozilima oznaka FL, EXII, EXIII ili MEMU, namenjena su za prevoz opasne robe u cisternama, baterijskim vozilima i demontažnim cisternama sa zapreminom većom od 1000 l ili gasnim kontejnerima MEGC, kontejner cisternama ili prenosivim cisternama sa zapreminom većom od 3000 l.
- Oznaka MEMU–predstavlja vozilo ili jedinicu koja je pričvršćena na vozilo, namenjenu za izradu eksplozivnih materija i predmeta, dok oznake EXII ili EXIII–predstavljaju vozila namenjena za prevoz eksplozivnih materija i predmeta.

U zavisnosti od konstrukcionog rešenja veza između nadgradnji i vozila, razlikujemo MEGC razdvojive i baterijske nerazdvojive nadgradnje (baterijska vozila).

- Baterijska vozila, tj. baterijske nadgradnje predstavljaju međusobno povezane elemente (posude pod pritiskom – boce, svežnjevi boca, burad, kao i cisterne za gasove čija zapremina prelazi 450 l) koji sistemom spojnih cevi, sigurnosnih uređaja, mernih

instrumenta i uređaja za punjenje i pražnjenje ostvaruju kompaktnu celinu i nerazdvojivom vezom su pričvršćeni za transportno vozilo.

- MEGC nadgradnje predstavljaju međusobno povezane elemente (posude pod pritiskom–boce, svežnjevi boca, burad, kao i cisterne za gasove čija zapremina prelazi 450 l) koji sistemom spojnih cevi, sigurnosnih uređaja, mernih instrumenta i uređaja za punjenje i pražnjenje ostvaruju kompaktnu celinu u namenski izrađenom kontejneru koji je sa razdvojivom vezom pričvršćen za transportno vozilo.

3.1.1 Motorna i priključna vozila

Proizvođači vozila u svetu kontinuirano rade na unapređenjima postojećih tipova vozila ali i na daljim razvojima potpuno novih vozila, prvenstveno u svrhu poboljšanja eksploataciono–tehničkih karakteristika. Analize se podjednako sprovode i sa strane proizvođača ali i sa strane korisnika vozila, upoređivanjem karakteristika novoproizvedenih vozila sa vozilima koja su već na tržištu i u eksploataciji. Posmatrano iz ugla specifičnosti vozila namenjenih za drumski transport gasova, dodatni tehnički zahtevi za konstrukciju vozila, kako je u prethodnom odeljku navedeno, posebno su definisani u Sporazumu (ECE 352), kao i nadovezujućim direktivama i pravilnicima i dr. Zahtevi se prvenstveno odnose na tehničke karakteristike vozila, poput zahteva za elektroopremu koja uključuje provodnike, sistem napajanja električnom energijom, baterije i akumulatore, električna kola, uređaj za prekidanje električnog napajanja i dr. Provodnici i električna kola moraju biti tako konstruisani i izvedeni da se mogućnost pregrevanja, kratkog spoja, varničenja ili mehaničkih udara svodi na najmanju moguću meru. Prostor za smeštaj baterija i akumulatora treba biti tako izveden i konstruisan da osigurava dobre izolacione i ventilacione osobine, pogotovo ako se baterije ili akumulatori nalaze blizu kabinskog prostora. U zavisnosti od svojstava opasne materije koja se transportuje, uređaj za prekidanje električnog napona treba biti izveden i jasno označen u kabini ili van kabine vozila, što je moguće bliže zoni akumulatora. Konstrukcija uređaja treba biti tako izvedena da onemogućuje nenamernu aktivaciju, uključivanje i isključivanje. Aktivacija uređaja mora prekidati sva strujna kola sem uređaja za ograničavanje brzine. Takođe, pored navedenog, definisani su i zahtevi koji se odnose na sistem kočenja vozila, postojanje uređaja protiv blokiranja točkova i uređaja za dugotrajno kočenje–usporivača. Naime, motorna i priključna vozila moraju zadovoljavati propise definisane Pravilnikom (ECE R13) u pogledu kočenja za vrste vozila N (teretna vozila) i O (priključna vozila). Primena i postojanje uređaja protiv blokiranja točkova i uređaja za dugotrajno kočenje u zavisnosti je od masenih parametara vučnih–motornih i priključnih vozila. Vučna vozila sa najvećom dozvoljenom masom iznad 16 tona i priključna vozila sa najvećom dozvoljenom masom iznad 10 tona, moraju biti opremljena uređajima za dugotrajno kočenje i uređajima protiv blokiranja točkova. Posebna pažnja u pogledu konstrukcije vozila za transport opasnih materija usmerava se i na zahteve koji se moraju ispuniti u svrhu prevencije rizika od požara, kao i uređaje za ograničenje brzine kretanja vozila i uređaje za spajanje vučnog i priključnog vozila. Zahtevi se odnose na regulatorne propise, tehničke karakteristike i izvođenja sistema za napajanje gorivom, rezervoara/boca/posuda za gorivo, kabine vozila i uređaja za naknadno dogrevanja kabine, pogonskog sistema vozila i izduvnog sistema vozila. Pogonski i izduvni sistem vozila, motori sa unutrašnjim sagorvevanjem zajedno sa sistemom izduvnih cevi ili elektropogon vozila, moraju biti tako konstruisani i izvedeni da opasnost od pregrevanja ili zapaljenja robe koja se transportuje svodi na najmanju moguću meru, navedeno u poglavlju 3.2 Pogonska goriva.

Tehnički zahtevi za konstrukciju vozila navedeni su u delu 9 Sporazuma (ECE 352), prikazano u Tabeli 7. Obavezna primena u odnosu na oznaku vozila prema nameni prikazana je simbolom (X).

Tabela 7. Dodatni tehnički zahtevi za konstrukciju vozila oznaka FL i AT

Primena zahteva	Oznaka vozila prema nameni	
Električna oprema	FL	AT
Opšte odredbe	X	X
Provodnici	X	X
Osigurači, prekidači kola	X	X
Akumulatori	X	X
Svetlosna oprema	X	X
Električni priključci između motornih vozila i prikolica	X	X
Uređaj za prekidanje električnog napajanja	X	
Oprema za kočenje	FL	AT
Opšte odredbe	X	X
Uređaj protiv blokiranja točkova	X	X
Uređaj za trajno kočenje vozila – usporivač	X	X
Prevencija rizika od požara	FL	AT
Rezervoari za gorivo/boce/posude	X	
Motor	X	
Izduvni sistem	X	
Elektropogon		X
Sistem za punjenje vozila – rekuperacija prilikom usporenja	X	X
Punjenje vozila sa spoljnog izvora	X	
Prevencija rizika od pregrevanja	X	
Vodonične gorivne ćelije	X	X
Sistem grejača sa naknadnim sagorevanjem	X	X
Uređaji za ograničenje brzine	X	X
Uređaji za spajanje motornih i priključnih vozila	X	X
Električna povezivanja vozila – uzemljenja	X	
Prevencija od rizika koji uzrokuju goriva	X	X

Izvor:
[1] Međunarodni sporazum o drumskom transportu opasne robe, izdanje 2023 i 2025 (ECE/326 i 352);
[2] Pravilnik (ECE R105), izdanje 2024. kojim su definisane jednobrazne odredbe za vozila namenjena za transport opasne robe.

Na Slici 2. prikazani su primeri baterijskog vozila i vozila sa MEGC nadgradnjama sa različitim tipovima posuda namenjenih za transport komprimovanog prirodnog gasa.



Slika 2. Vozila i nadgradnje namenjene za transport komprimovanog priridnog gasa
(Izvori: PFC; EKS UAE, Gaznet Ltd; Hexagon Composites i Autor)

Na Slikama 3 i 4. prikazani su primeri vučnih vozila – tegljača, različitih proizvođača sa različitim vrstama pogonskih goriva, koja se mogu primenjivati za transport gasova.

Na Slici 3. prikazan je tegljač sa pogonom na komprimovani prirodni gas KPG sa identifikacionim pločicama na kojima su sadržani podaci o osnovnim tehničkim karakteristikama i regulatornim propisima. Tehničke karakteristike sadrže naziv proizvođača vozila, broj odobrenja tipa vozila, identifikacionu oznaku vozila VIN *(engl. Vehicle Identification Number)*, masene parametre, tip motora i broj osovina. Takođe, u svrhu lakše identifikacije vozila, naglašeni su ispunjeni regulatorni propisi, poput Pravilnika o jednoobraznim odredbama za odobrenje vozila u pogledu katadioptera (ECE R3), elektromagnetne kompatibilnosti (ECE R10), kočenja (ECE R13), konstrukcije kabine i zaštite vozača (ECE R29), uređaja za ograničenje brzine kretanja (ECE R89), kao i Pravilnika o jednoobraznim odredbama za odobrenje vozila namenjenih za transport opasnih materija u pogledu konstruktivnih karakteristika (ECE R105) i Pravilnika o jednoobraznim odredbama za odobrenje određenih delova motora i vozila, u pogledu instalacija za upotrebu gasovitih goriva, komprimovanog i utečnjenog prirodnog gasa (ECE R110).



Slika 3. Vučno vozilo – tegljač sa pogonom na KPG *(Izvor: Autor)*

Na Slici 4. prikazan je tegljač sa pogonom na dizel gorivo sa identifikacionim pločicama na kojima su sadržani podaci o osnovnim tehničkim karakteristikama i ispunjenju regulatornog propisa datog u Pravilniku (ECE R105) sa naglašenim oznakama vozila prema nameni. Kako je prethodno pomenuto, pre svega u svrhu lakše identifikacije, vozila za prevoz opasnih materija imaju oznake o ispunjenju propisa na šasiji ili kabini vozila, koje su u saglasnosti sa pratećom tehničkom dokumentacijom vozila (poput potvrde/sertifikata o saobraznosti COC *(engl. Certificate of conformity)*, potvrda proizvođača vozila i dr. Bitno je i naglasiti da identifikacione oznake na vozilima, kao na primeru Slika 3. i 4., razlikuju od prizvođača vozila, dok se sve potrebne informacije o nameni vozila utvrđuju pregledom vozila i prateće tehničke dokumentacije.



Slika 4. Vučno vozilo – tegljač sa pogonom na dizel *(Izvor: Autor)*

3.1.2 Nadgradnje namenjene za transport komprimovanog prirodnog gasa

Tehnologija drumskog transporta prirodnog gasa, kako je pomenuto u prethodnim poglavljima rada, u zavisnosti je od agregatnog stanja u kom se gas nalazi, raspoloživosti infrastrukture i voznih resursa, primenljivosti tehnologije, početnih zahteva i dr. Transportni proces od mesta utovara do mesta istovara gasa zasnovan je na vozilima i nadgradnjama čiji je princip rada u funkciji od agregatnog stanja gasa tokom transporta. U skladu s tim, razlikujemo kriogene posude i cisterne, baterijska vozila, MEGC nadgradnje, svežnjeve posuda i dr. Transport i skladištenje prirodnog gasa u komprimovanom stanju obavlja se sa vozilima oznaka FL i nadgradnjama kodne oznake CxBN(M), kao i nadgradnjama sa narednim dozvoljenim kodnim oznakama dato u Tabeli 6. U zavisnosti od koncepcije gradnje vozila i nadgradnji, na tržištu su prisutna različita tehnička rešenja za transport prirodnog gasa, poput gasnih kontejnera sa više elemenata (MEGC nadgradnji), baterijskih vozila, svežnjeva boca–posuda i dr. Rešenja se zasnivaju na cilindričnim bešavnim posudama pod pritiskom, izrađenim od visoko kvalitetnih metalnih ili kompozitnih materijala, koje u određenom tipu nadgradnje (sistemom spojnih cevi, sigurnosnih uređaja, mernih instrumenta, uređaja za punjenje i pražnjenje i dr.) ostvaruju kompaktnu celinu. Primena posuda pod pritiskom i njihove odgovarajuće instalacije namenjene za drumski transport komprimovanog prirodnog gasa moguća je, samo ukoliko je u saglasnosti sa propisima i zahtevima navedenim u Direktivi koja se odnosi na pokretnu opremu pod pritiskom (2010/35/EU) i Sporazumu (ECE 352).

Kompaktna celina ostvaruje se u namenskim okvirima, izrađenim od metalnih materijala, čije dimenzije odgovaraju zakonski dozvoljenim dimenzijama vozila. U slučaju gasnih kontejnera, MEGC nadgradnji, posude su montirane u kontejnere koji sistemom brava ostvaruju vezu sa transportnim vozilom. Položaj posuda i njihove dimanzije, kao i dimenzije ramova ili kontejnera u zavisnosti su od proizvođača nadgradnji i mogu varirati. Na tržištu, prisutna su različita izvođenja posuda, koja se prvenstveno razlikuju u primenjenom materijalu izrade ali i dimenzijama i položaju ugradnje na transportna vozila. U zavisnosti od materijala izrade, razlikujemo posude izrađene od metalnih materijala, visokokvalitetnih čelika i legura aluminijuma, i kompozitnih materijala. Primena različitih materijala, kao i njihova kombinacija doprinosi unapređenju eksploataciono–tehničkih karakteristika posuda, koje odgovaraju generacijskim unapređenjima posuda. Generacijska unapređenja mogu se objasniti postepenim uvođenjem kompozitnih materijala za izradu posuda i data su u odnosu na oznakama tipa posuda (Tip–1, Tip–2, Tip–3, Tip–4 i Tip–5) prikazano na Slikama 5–12.

Položaj ugradnje posuda u kontejnerima kao i njihove dimenzije u zavisnosti su od regulatornih propisa, proizvođača nadgradnje, materijala izrade posuda ali i konačnog zahteva naručioca. Na tržištima su prisutne posude različitih dimenzija, čiji se prečnici kreću od 250 do 700 mm i dužine od 1000 do 11000 mm, dok se zapremine i radni pritisci kreću u rasponu od 150 do 3000 dm^3, odnosno od 20 do 25 MPa. Prema položaju ugradnje, u ramovima ili kontejnerima, posude se postavljaju horizontalno (prateći uzdužnu osu transportnog vozila) ili vertikalno (upravno na osu transportnog vozila). Kod oba načina izvođenja, ramova u slučaju baterijskih vozila ili kontejnera u slučaju MEGC nadgradnji, posude moraju biti tako izvedene da ne postoji mogućnost od podužnog, bočnog i vertikalnog pomeranja tokom eksploatacije. Dimenzije ramova ili kontejnera, namenjenih za prihvat i smeštaj posuda, odgovaraju dimenzijama tovarnog prostora transportnih vozila. U slučaju MEGC nadgradnji, najprisutniji su kontejneri čije se dužine kreću u rasponu od 3000 do 12000 mm.

U ovom delu istraživanja predstavljena su konvencionalna i savremena rešenja nadgradnji, posuda pod pritiskom koje su sastavni deo baterijskih ili MEGC nadgradnji namenjenih za

skladištenje i transport komprimovanog prirodnog gasa. Kako je pomenuto, tehnička rešenja posuda pod pritiskom namenjenih za transport gasa u komprimovanom stanju, mogu varirati po pitanju dimenzija, materijala izrade, debljina materijala, zapremina, radnih pritisaka itd. Pored zapremine i maksimalnog radnog pritiska posude, veoma važna karakteristika je odnos sopstvene mase posude prema komprimovanoj masi gasa. Sopstvena masa posude u direktnoj je zavisnosti od materijala izrade posude, dok na komprimovanu masu gasa u posudi utiče više faktora, pre svega: fizičko–hemijske svojstva gasa, radni pritisak, zapremina i temperaturni uslovi u trenutku punjenja. Dalje u tekstu biće prikazana osnovna podela posuda prema tipovima (generacijskim unapređenjima eksploataciono–tehničkih karakteristika), koja uključuje relevantne propise koji se odnose na projektovanje, izradu i ispitivanje. Takođe, navešće se i određene specifičnosti karakteristične za pojedine tipove posuda, bezbedonosni aspekti, prednosti i nedostaci primene, kao i postojeća rešenja ugradnje na transportnim vozilima.

3.1.2.1 Posude izrađene od metalnih materijala Tip–1

Posude Tip–1 predstavljaju cilindrične bešavne posude izrađene od metalnih materijala, čelika ili legura aluminijuma namenjenih za opremu pod pritiskom, saglasno propisima navedenim u Direktivi (2010/35/EU) i Sporazumu (ECE 352), kao pratećim standardima koji se odnose na projektovanje, izradu i ispitivanje posuda, poput serije standarda (ISO 9809, ISO 7866, ISO 11120 i dr.). Prema navedenim standardima posude se dimenziono izrađuju u rasponu od 150 do 3000 dm^3, nakon čega sa pratećom opremom (koja sačinjava sisteme spojnih cevi, sigurnosne uređaje, merne instrumente i uređaje za punjenje i pražnjenje) integrišu u namenske ramove ili kontejnere koji se naknadno postavljaju na transportna vozila. Postupci integracije na vozila sprovode se u sa saglasnosti sa prethodno navedenim propisima i standardom (EN 13807), koji se odnosi na projektovanje, izradu, identifikaciju i ispitivanje baterijskih ili MEGC nadgradnji.

Na Slici 5. prikazan je delimičan presek posude izrađene od metalnih materijala Tip–1. Sa slike se uočava masivna konstrukcja debelozidne bešavne cilindrične posude, izrađene primenom postupka dubokog izvlačenja, sa istaknutnim navojem u vratnom delu. Bezbedonosni aspekti i održavanja, zadovoljenje bezbedonosno–tehničkih karakteristika posuda zasnovani su na brojnim ispitivanjima u procesu proizvodnje posuda i kasnijim redovnim pregledima i kontrolisanjima tokom eksploatacionog perioda. Redovnim pregledima, obuhvaćene su sve radnje koje operateri opreme sprovode, kao i obavezne radnje koje sprovode nadležni državni organi u svrhu potvrde bezbedonosno–tehničkih karakteristika opreme. Navedene radnje obuhvataju prva kontrolisanja, periodična kontrolisanja i međukontrolisanja opreme, kako je definisano u Sporazumu (ECE 352) i standardima (EN 13807, ISO 9809, ISO 7866, ISO 11120 i dr.) koji se odnose na projektovanje, izradu i ispitivanje baterijskih i MEGC nadgradnji, kao i pojedinačnih posuda. Period eksploatacije posuda Tip–1, definisan u referentnim standardima izrade (ISO 9809, ISO 7866, ISO 11120 i dr.), mora biti potvrđen



Slika 5. Delimičan presek cilindrične bešavne posude Tip–1
(Izvor: luxfercylinders.com)

programom ispitivanja veka upotrebe i kao takav odobren od nadležnog državnog organa države u kojoj je posuda napravljena. Nadležni državni organ, odgovoran je za izdavanje odobrenja tipa i znaka usaglašenosti posude. Period eksploatacije posuda Tip–1 ograničen je na maksimalno 20 godina eksploatacije od dana proizvodnje.

Osnovne prednosti posuda izrađenih od metalnih materijala, pre svega čelika, su dostupnost i cena nabavke. Pouzdana tehnologija izrade i dostupnost osnovnih materijala, čelika i aluminijuma, omogućava da posude Tip–1 imaju dobru konkurentnost u ceni nabavke i raspoloživosti. Takođe, pored navedenog, posude izrađene od metalnih materijala pogodnije su za primenu tehnika brzih punjenja (komprimovanja) *(engl. fast fill)* u odnosu na posude izrađene od kompozitnh materijala. Naime, prilikom brzog komprimovanja dolazi do porasta temperature unutar posude što negativno utiče na količinu komprimovanog gasa, dodatne obloge – kompozitni materijal usporavaju hlađenje, što dovodi do povećanje vremena komprimovanja i zadržavanja na mestu utovara robe. S druge strane, osnovni nedostaci posuda izrađenih od metalnih materijala ogledaju se u tehničkim karakteristikama, koje se odnose na masene parametre, zapreminske kapacitete i radne pritiske posuda. Posude izrađene od metalnih materijala, pogotovo čelika, imaju nepovoljan maseni odnos sopstvene mase posude i mase komprimovanog gasa. Takođe, zbog konstruktivnih ograničenja, koji proističu od masenih parametara, u eksploataciji su prisutne posude manjih zapremina i nešto nižih radnih pritisaka do 20 MPa. Dodatno, posude izrađene od metalnih materijala podložne su degradaciji materijala usled pojave korozije. Svoju primenu nalaze u svim privrednim sektorima, kao pojedinačne posude, sastavni elementi svežnjeva posuda, MEGC nadgradnji ili baterijskih vozila.

U datom kontekstu, na Slici 6. prikazan je primer baterijskog vozila, sa horizontalno postavljenim posudama Tip–1 izrađenim od čelika, namenjenenog za transport komprimovanog prirodnog gasa, UN oznake 1971. Takođe, u sastavu slike prikazana je identifikaciona pločica, obavezni deo baterijskog vozila sa naglašenim tehničkim karakteristikama i regulatornim propisima.



Slika 6. Baterijsko vozilo sa posudama Tip–1 ***(Izvor: Autor)***

Tehničke karakteristike i regulatornim propisima sadrže: naziv proizvođača i odobrenje tipa vozila i nadgradnje, serijski broj, datum proizvodnje, datum prvog kontrolisanja sa žigom stručnog lica odobrenog od nadležnog državnog organa, zatim posebne odredbe TA4 i TT9 (koje se odnose na nadležni državni organ ili kontrolno telo, tj. da je akredtovano u skladu sa

standardom ISO 17020), vrednosti maksimalnog radnog i ispitnog pritiska, radni temperaturni opseg, broj ramova, ukupan broj posuda, ukupnu zapreminu nadgradnje, kod (cisterne) nadgradnje i π oznaku. Slovnobrojčana oznaka (kod) nadgradnje C300BN, pruža informacije da se radi o baterijskom vozilu sa maksimalnim ispitnim pritiskom od 30 MPa (300 bar), koje poseduje tri stepena zatvaranja i koje je opremljeno sigurnosnim ventilom. Oznaka π pruža informacije da je baterijska vozilo (nadgradnja) u saglasnosti sa Direktivom (2010/35/EU).

3.1.2.2 Posude sa osnovom izrađenom od metalnih materijala i delimično obložene kompozitnim materijalima Tip–2

Posude Tip–2 predstavljaju inženjerski odgovor na osnovne nedostatke posuda Tip–1. Osnova cilindrične bešavne posude izrađena je od visokokvalitetnih čelika ili legura aluminijuma koja je dodatno ojačana kompozitnim vlaknima na cilindričnim delovima posude, saglasno propisima navedenim u Direktivi (2010/35/EU) i Sporazumu (ECE 352) i standardima koji se odnose na izradu i ispitivanje posuda ojačanih po obimu od kompozitnih vlakana, poput standarda (ISO 9809, ISO 7866, ISO 11120, ISO 11119, ISO 11515, EN 12257 i dr.). U svrhu unapređenja tehničkih karakteristika, redukcije sopstvene mase posude i povećanja zapremine i radnih pritisaka posude su ojačane kompozitnim materijalima na cilindričnom delovima posude. Prema navedenim standardima, koji se odnose na projektovanje, izradu i ispitivanje posuda, ojačanja mogu biti izvedena od kombinacije epoksidnih smola i staklenih, aramidnih ili ugljeničnih vlakana. Posude se izrađuju u rasponu od 150 do 3000 dm^3, nakon čega sa pratećom opremom (koja sačinjava sisteme spojnih cevi, sigurnosne uređaje, merne instrumente i uređaje za punjenje i pražnjenje) integrišu u namenske ramove ili kontejnere koji se naknadno postavljaju na transportna vozila u skladu sa standardom (EN 13807). Smatra se da je kompatibilnost materijala izrade posuda i opasne materije ispunjena ako su zadovoljeni uslovi iz grupe standarda (ISO 11114) koji se odnose na metalne i nemetalne materijale.

Na Slici 7. prikazan je delimičan presek posude čija je osnova (1) izrađena od metalnih materijala sa dodatnim ojačanjima od kompozitnih vlakana (2). Sa slike se uočava masivna konstrukcija metalne debelozidne bešavne cilindrične posude, čija je osnova izrađena primenom postupka dubokog izvlačenja, sa istaknutnim navojem u vratnom delu i kompozitnim ojačanjima na cilindričnom delu posude. Bezbedonosni aspekti i održavanja, kao i u slučaju posuda Tip–1, zadovoljenje bezbedonosno–tehničkih karakteristika posuda zasnovani su na brojnim ispitivanjima u procesu proizvodnje posuda i kasnijim redovnim pregledima i kontrolisanjima tokom eksploatacionog perioda. Redovnim pregledima, obuhvaćene su sve radnje koje operateri opreme sprovode, kao i obavezne radnje koje sprovode nadležni državni organi u svrhu potvrde bezbedonosno–tehničkih karakteristika opreme. Period eksploatacije posuda Tip–2, definisan u referentnim standardima izrade (ISO 9809, ISO 7866, ISO 11120, ISO 11119, ISO 11515, EN 12257 i dr.), i mora biti potvrđen programom ispitivanja veka upotrebe i odobren od nadležnog državnog organa države u kojoj je posuda



Slika 7. Delimičan presek cilindrične bešavne posude Tip–2
(Izvor: luxfercylinders.com)

napravljena. Period eksploatacije posuda Tip–2 ograničen je na maksimalno 20 godina eksploatacije od dana proizvodnje. Osnovne prednosti posuda Tip–2 u odnosu na posude Tip–1 su manja sopstvena masa, mogućnost izrade posuda većih zapremina i bolji odnos sopstvene mase posude i komprimovane mase gasa. Ojačanja od kompozitnih materijala omogućavaju projektovanje i izradu posuda manjih debljina i većih zapremina, što za posledicu ima manju sopstvenu masu posude i veće količine komprimovanog gasa. Kao osnovni nedostaci ovog tipa posuda navode se ograničenja po pitanju tehničkih karakteristika, prvenstveno na radne pritiske koji su ograničeni na 20 MPa i vreme komprimovanja, posude Tip–2 duže se hlade u odnosu na posude Tip–1. Ograničenja po pitanju radnih pritisaka posude Tip–2 primetna su ukoliko se uporede količine komprimovanog gasa po posudi sa narednim generacijskim unapređenjima, odnosno kompozitnim posudama Tip 3 i 4, gde su značajne razlike u količini komprimovanog gasa po posudi. Takođe, izloženi delovi metalne osnove, danca posude, podložna su degradaciji materijala usled korozije ili mehaničkih oštećenja. Posude Tip–2 svoju primenu nalaze u svim privrednim sektorima, kao pojedinačne posude, sastavni elementi svežnjeva posuda, MEGC nadgradnji ili baterijskih vozila. Naročito se ističe primena u automobilskoj i medicinskoj industriji, poput rezervoara za gasovita goriva ili posuda za medicinski kiseonik. Takođe, primetna je i primena u drumskom transportu gasova, kao alternativa posudama Tip–1 za primenu na baterijskim i MEGC nadgradnjama.

Na Slici 8. prikazan je skup vozla, koji obuhvata vučno vozilo–tegljač sa pogonom na dizel gorivo i poluprikolicu sa MEGC nadgradnjom opremljenom sa vertikalno postavljenim posudama Tip–2, namenjenim za transport gasova u komprimovanom stanju.



Slika 8. Skup vozila sa MEGC nadgradnjom i posudama Tip–2 ***(Izvor: https://macel-plin.hr/)***

3.1.2.3 Posude sa osnovom izrađenom od metalnih materijala i potpuno obložene kompozitnim materijalima Tip–3

Tehnička rešenja koja su doprinela unapređenjima eksploataciono–tehničkih karakteristika posuda Tip–2, rezultirala su rešenjima primenjenim na posudama Tip–3. Konstrukciono rešenje posude Tip–3 zasnovano je na tankozidnoj bešavnoj cilindričnoj osnovi, izrađenoj od visokokvalitetnih čelika i legura aluminijuma, koja je potpuno obložena kompozitnim materijalima (epoksidnim smolama i aramidnim, staklenim ili ugljeničnim vlaknima). Primenjena rešenja izrade u saglasnosti su sa propisima navedenim u Direktivi (2010/35/EU) i Sporazumu (ECE 352), kao i standardima koji se odnose na projektovanje, izradu i ispitivanje posuda ojačanih po obimu od kompozitnih vlakana, poput standarda (ISO

11119, ISO 11515, EN 12257 i dr.). Posude se izrađuju u rasponu od 150 do 3000 dm3, nakon čega se sa pratećom opremom (koja sačinjava sisteme spojnih cevi, sigurnosne uređaje, merne instrumente i uređaje za punjenje i pražnjenje) integrišu u namenske ramove ili kontejnere koji se naknadno postavljaju na transportna vozila, u skladu sa standardom (EN 13807). Najčešće u primeni su posude zapremina od 350 do 450 dm3. Kompatibilnost materijala izrade posude i opasne materije–gasa je ispunjena ako su zadovoljeni uslovi iz grupe standarda koji se odnose na metalne i nemetalne materijale (ISO 11114).

Na Slici 9. prikazan je delimičan presek posude čija je osnova (1) izrađena od metalnih materijala sa istaknutnim metalnim navojem u vratnom delu i potpuno obložena kompozitnim materijalima (2). Sa slike se uočava konstrukcja metalne tankozidne bešavne cilindrične posude, čija je osnova izrađena primenom postupka dubokog izvlačenja i koja je naknadno, primenom postupka namotavanja, potpuno obložena kompozitnim vlaknima. Bezbednost i održavanja posuda Tip–3, kao i u slučaju posuda Tip–1 i 2, zasnovana je na ispitivanjima u procesu proizvodnje posuda i kasnijim redovnim pregledima i kontrolisanjima tokom eksploatacionog perioda. Redovnim pregledima obuhvaćene su sve radnje koje operateri opreme sprovode i obavezne radnje koje sprovode nadležni državni organi u svrhu potvrde bezbedonosno–tehničkih karakteristika opreme. Period eksploatacije posuda Tip–3, definisan je referentim standardima izrade (ISO 11119, ISO 11515, EN 12257 i dr.) i Sporazumu (ECE 352), i kao takav mora biti potvrđen programom ispitivanja veka upotrebe posude i odobren od nadležnog državnog organa države u kojoj je posuda napravljena. Period eksploatacije posuda ograničen je na maksimalno 20 godina od dana proizvodnje.



Slika 9. Delimičan presek cilindrične bešavne posude Tip–3
(Izvor: luxfercylinders.com)

Osnovne prednosti posuda Tip–3 u odnosu na prethodne tipove posuda su viši radni pritisci, manja sopstvena masa, kao i bolji odnos ukupne mase posude prema komprimovanoj masi gasa. Razlika u sopstvenim masama u zavisnosti je od proizvođača posuda. Poredeći posude Tip–1 i 3 ta razlika je do 70% u korist posuda Tip–3, a u slučaju posuda Tip–2 i 3, razlika u sopstvenim masama kreće se u rasponu od 40% do 60%. Posude izrađene od kompozitnih materijala odlikuju dobra mehanička svojstva čija primena omogućava projektovanje i izradu posuda većih dimenzija i radnih pritisaka, što za posledicu ima manju sopstvenu masu i mogućnost komprimovanja većih količina gasa. Osnovni nedostaci ogledaju se u visokim troškovima finalnog proizvoda, koji su viši u odnosu na predhodne tipove. Novija izvođenja posuda zasnivaju na osnovama izrađenim od legura aluminijuma, saglasno standardu koji se odnosi na projektovanje, konstrukciju i ispitivanje bešavnih cilindričnih posuda (ISO 7866, ISO 11119, ISO 11515, EN 12257 i dr.). Posude Tip–3 svoju primenu nalaze u svim privrednim sektorima, kao pojedinačne posude, sastavni elementi svežnjeva posuda, MEGC nadgradnji ili baterijskih vozila.

Na Slici 10. prikazano je priključno vozilo, poluprikolica sa MEGC nadgradnjom opremljenom sa vertikalno postavljenim posudama Tip–3, namenjenim za transport komprimovanih gasova.



Slika 10. Poluprikolica sa MEGC nadgradnjom i posudama Tip–3 ***(Izvor: https://hexagonpurus.com)***

3.1.2.4 Posude izrađene od nemetalnih materijala i potpuno obložene kompozitnim materijalima Tip–4

Iznalaženje novih tehnoloških rešenja u svrhu boljih iskorišćenja masenih kapaciteta transportnih vozila i transporta većih količina gasa, zasnivaju se na posudama manjih sopstvenih masa sa većim radnim pritiscima i zapreminama. Za ispunjenje ovih ciljeva nameću se savremeni kompozitni materijali kao rešenja za izradu posuda pod pritiskom. Konstrukciono, rešenja posuda Tip–4 zasnovana su na tankozidnoj bešavnoj cilindričnoj osnovi, izrađenoj od visokokvalitetnih polimernih materijala, koja je potpuno obložena kompozitnim materijalima (epoksidnim smolama i aramidnim, staklenim ili ugljeničnim vlaknima). Rešenjima koja su u saglasnosti sa propisima navedenim u Direktivi (2010/35/EU) i Sporazumu (ECE 352), kao i standardima koji se odnose na projektovanje, izradu i ispitivanje posuda ojačanih po obimu od kompozitnih vlakana, poput standarda (ISO 11119, ISO 11515, EN 12257 i dr.). Posude Tip–4 izrađuju se u rasponu od 150 do 3000 dm^3, nakon čega sa pratećom opremom (koja uključuje sisteme spojnih cevi, sigurnosne uređaje, merne instrumente i uređaje za punjenje i pražnjenje) integrišu u namenske ramove ili kontejnere koji se naknadno postavljaju na transportna vozila, u skladu sa standardom (EN 13807). Najčešće u primeni su posude zapremina od 350 do 450 dm^3. Kompatibilnost materijala izrade posude i gasa koji se transportuje, ispunjena je ako su zadovoljeni uslovi iz grupe standarda (ISO 11114), koji se odnose na metalne i nemetalne materijale.

Na Slici 11. prikazan je delimičan presek posude čija je osnova (1) izrađena od polimernih materijala (polietilena visoke gustine HDPE *(engl. high-density polyethylene)* sa istaknutnim metalnim priključkom u vratnom delu posude, koja je potpuno obložena kompozitnim materijalima (2). Bezbednost i održavanja posuda Tip–4, kao i u slučaju prethodnih tipova, zasnovana je na brojnim ispitivanjima u procesu proizvodnje posuda i kasnijim redovnim pregledima i kontrolisanjima tokom eksploatacionog perioda. Redovnim pregledima, obuhvaćene su sve radnje koje operateri opreme sprovode, kao i obavezne radnje koje sprovode nadležni državni organi u svrhu potvrde bezbedonosno–tehničkih karakteristika opreme. Period eksploatacije posuda Tip–4, definisan je referentim standardima izrade (ISO 11119, ISO 11515, EN 12257 i dr.) i Sporazumu (ECE 352), i kao takav mora biti potvrđen programom

ispitivanja veka upotrebe posude i odobren od nadležnog državnog organa države u kojoj je posuda napravljena. Period eksploatacije posuda ne sme biti manji od 15 godina i ograničen je na maksimalno 20 godina eksploatacije od dana proizvodnje (ECE 352). Prednosti posuda Tip–4 u odnosu na posude Tip–3 su: manja sopstvena masa, veći radni pritisci, bolje iskorišćenje masenih kapaciteta vozila, bolji odnos sopstvene mase posude i komprimovane mase gasa i niži troškovi izrade u odnosu na posude Tip–3. Kao nedostaci posuda Tip–4 navode se izrazito visoki troškovi nabavke, kao i slabija otpornost na ciklična opterećenja i brza punjenja posuda, sa osnovnim ciljem skraćenja vremenskog zadržavanja transportnih vozila na mestima utovara robe. Posude Tip–4 pogodnije su za sistem sporog punjenja i primenjuju se u svim privrednim sektorima, kao pojedinačne posude, sastavni elementi svežnjeva posuda, MEGC nadgradnji ili baterijskih vozila.



Slika 11. Delimičan presek cilindrične bešavne posude Tip–4 *(Izvor: luxfercylinders.com)*

Na Slici 12. prikazano je priključno vozilo namenjeno za transport komprimovanog prirodnog gasa. Poluprikolica je opremljena sa zatvorenom MEGC nadgradnjom i vertikalno postavljenim posudama Tip–4.



Slika 12 Poluprikolica sa MEGC nadgradnjom i posudama Tip–4 *(Izvor: Autor)*

U sastavu Slike 11. na identifikacionoj pločici, navedene su eksploataciono–tehničke karakteristike i regulatorni propisi nadgradnje, poput: naziva proizvođača, π oznake i serijskog broja nadgradnje, maksimalnog radnog i ispitnog pritiska, ukupnog broj posuda postavljenih u nadgradnji i ukupne zapremine. Takođe, pored navedenog identifikaciona pločica sadrži i kodnu oznaku i namenu (cisterne) nadgradnje, godinu proizvodnje, radni temperaturni opseg, standard izrade i oznaku odobrenja tipa. Slovnobrojčana oznaka nadgradnje C375BH i oznaka tipa, pružaju informacije da je u pitanju hermetički zatvorena MEGC nadgradnja, namenjena za skladištenje i transport komprimovanog prirodnog gasa sa maksimalnim ispitnim pritiskom od 37,5 MPa (375 bar) koja je opremljena sa tri stepena zatvaranja. Osnovne razlike između generacijskog unapređenja novih posuda Tip–5 u odnosu na Tip–4, su u konstrukcionim rešenjima. Naime, kod posuda Tip–5 osnova, omotač i vratni deo za prihvat gasne instalacije

potpuno su izrađeni od kompozitnih materijala, dok je deo za prihvat gasne instalacije izrađen od metalnih materijala.

Polazeći od prethodno navedenog, u svrhu doprinosa izboru posuda i nadgradnji namenjenih za transport gasova, Tabelom 8., sistematizovan je odnos generacijskih unapređenja posuda, u pogledu masenih iskorišćenja, radnih pritisaka, složenosti tehnologije izrade, kao i troškova izrade i nabavke.

Tabela 8. Poređenje generacijskih unapređenja posuda namenjenih za transport komprimovanih gasova

Masena iskorišćenja	**Tehnologija izrade**
Tip–1 < Tip–2 < Tip–3 < Tip–4 ≈ Tip–5	Tip–1 < Tip–2 < Tip–3 < Tip–4 ≈ Tip–5
Radni pritisci	**Troškovi izrade i nabavke**
Tip–1 < Tip–2 < Tip–3 ≤ Tip–4 ≈ Tip–5	Tip–1 < Tip–2 < Tip–3 ≤ Tip–4 < Tip–5

Izvor:
[1] Luxfer CNG Mobility Applications. https://www.luxfercylinders.com;
[2] EKC UAE. CASCADES MEGC. https://www.ekcuae.com/products/cascades-megc/;
[3] PFC. homepage. https://pfc.hr/;
[4] Gaznet Ltd. H2 and CNG MEGC containers. https://megccng.com/h2-and-cng-containers-gaznet-ltd/cng-transport-gas-container/;
[5] Additive Manufacturing for Lightweight Structural Components. https://www.addcomposites.com/;
[6] Hexagon Composites ASA. https://hexagongroup.com/markets/gas-distribution;
[7] City Machine and Welding, Inc. https://cmwelding.com/products;
[8] Koyuncu Gas and Gas Equipment. https://www.koyuncutas.com/en/product/;
[9] Faber Industrie SPA. https://faber-italy.com/;
[10] FIBA Technologies, Inc. https://www.fibatech.com/products/.

3.1.3 Bezbedonosni aspekti primene različitih tipova posuda, vozila i nadgradnji namenjenih za transport komprimovanih gasova

Dosadašnja istraživanja sa stanovišta bezbednosti i sigurnosti primene posuda, vozila i nadgradnji namenjenih za transport gasova zasnivaju se na procenama i potvrdama integriteta konstrukcije tokom projektovanog veka upotrebe, primenom numeričkih analiza, eksperimentalnih ispitivanja ali i postupaka kontrolisanja sprovedenih od imenovanih tela. Postupci procene i potvrde integriteta konstrukcije sa stanovišta eksperimentalnih ispitivanja i numeričkih analiza zasnovani su na ispitivanjima pojedinačnih posuda i njihovih komponenti ili sistema u celini, tj. kompletnih vozila i nadgradnji. U datom kontekstu, prvenstveno u zavisnosti od tehnologije i materijala izrade posuda, razmatraju se brojni aspekti koji utiču na bezbednost i sigurnost primene posuda ili sistema u celini, poput ispitivanja na udare, vibracije, otvoreni plamen, ciklična opterećenja koja se javljaju u postupcima punjenja i pražnjenja, curenja i dr. (Azuma, Oimatsu, Oyama, Kamiya, Igashira, Takemura and Takai, 2014; Lasn and Echtermeyer, 2014; Mair, 2017; Wang, Xu, Wang, S., Xu, Q., and Ho, 2020; Mair, Thomas, Schalau and Wang, 2021; Sharma, Chugh and Neogi, 2021; Solazzi and Vaccari, 2022; Azeem, Ya, Alam, Kumar, Stabla, Smolnicki and Mustapha, 2022; Meng, Jin, Yu, Mehari and Jiang, 2024; Agne, Almeida, Maruyama, De Souza, Amico and Tonatto, 2025; Jeon and Park, 2025; Takođe, pomenutim istraživanjima doprinose i postupci potvrde integriteta konstrukcije kompletnih vozila i nadgradnji, pri realnim uslovima eksploatacije sprovedeni na osnovu redovnih kontrolisanja od strane imenovanih tela. Važno je istaći da rezultati dobijeni eksperimentalnim ispitivanjima, numeričkim analizama ili postupcima redovnih kontrolisanja sprovedenih od imenovanih tela, doprinose i postupcima upravljanja rizicima. Navedeni doprinosi ogledaju se kroz važne informacije koje se mogu iskoristiti za identifikaciju, analizu i procenu potencijalnih rizika koji proističu od drumskog transporta gasa. Pre svega, rizika od pojave požara ili isticanja gasa, degradacije materijala izazvanog od zračenja ill korozije, preopterećenja izazvanih od visokih pritisaka ili temperatura, nesavesnog ili nehotičnog rukovanja i dr., kao i njihovih uticaja na imovinu, zdravlje ljudi i životnu sredinu.

U Tabeli 9, dat je pregled dosadašnjih istraživanja sa stanovišta bezbednosti i sigurnosti primene posuda, vozila i nadgradnji namenjenih za transport gasova. Zajednički cilj istraživanja je unapređenje bezbednosti i sigurnosti primene posuda ili kompletnih vozila i nadgradnji namenjenih za transport gasova tokom projektovanog perioda eksploatacije.

Tabela 9. Pregled istraživanja sa stanovišta bezbednosti i sigurnosti primene posuda, vozila i nadgradnji namenjenih za transport gasova

Istraživanje	Primena	Opis
Azuma et. al., 2014	Vozila i nadgradnje	U radu kao doprinos bezbednosti i sigurnosti skladištenja i transporta komprimovanih gasova primenom baterijskih nadgradnji, razmatraju se rizici koji prate drumski transportni proces vodonika. Istraživanje je obuhvatilo ispitivanja na dve novoizgrađene baterijske nadgradnje sa kompozitnim posudama u svrhu utvrđivanja eksploataciono–tehničkih karakteristika u realnim uslovima vožnje. Ispitivanja su obuhvatila postupke procene integriteta i veka upotrebe posuda, njihove opreme i komponenti na udare, vibracije, otvoreni plamen, cikličnih opterećenja posuda u postupcima punjenja i pražnjenja, curenja i dr. Takođe, rezultati ispitivanja su doprineli utvrđivanju potencijalnih rizika primene nadgradnji namenjenih transportu gasova na imovinu, zdravlje ljudi i životnu sredinu. Navedeno se prvenstveno odnosi na rizike koji potiču od konstrukcionih rešenja vozila, posuda i opreme, zatim rizika koji potiču od postupaka manipulacije gasom, punjenja i pražnjenja, visokih pritisaka, nesavesnog ili nehotičnog rukovanja, požara i dr. Osnovni doprinosi istraživanja ogledaju se u smernicama za primenu kompozitnih posuda za transport gasova, sa ciljem unapređenja bezbednosti i sigurnosti primene tokom projektovanog veka upotrebe. Takođe, rezultati doprinose i minimalizaciji rizika koji prate drumski transportni proces, pružajući informacije za identifikaciju potencijalnih rizika u početnim fazama upravljanja.
Sharma et. al., 2021; Agne et. al., 2025.	Pojedinačne posude	U istraživanjima, kao doprinos pouzdanosti i sigurnosti primene posuda izrađenih od kompozitnih materijala namenjenih skladištenju i transportu komprimovanih gasova, razvijeni su modeli procene integriteta posuda, kritičnog pritiska i procurivanja pre loma. Modeli na osnovu tehnologije izrade posuda, načina namotavanja vlakana, debljine zida i radnih parametara pritiska i temperature, izračunavaju kritične vrednosti pritisaka i trenutka procurivanja. U poređenju sa eksperimentalnim ispitivanjima razaranja posuda prosečna greška modela iznosi oko 2,4%. Rezultati istraživanja prikazuju da je sa modelima moguće pouzdano proceniti kritične vrednosti pritisaka na osnovu parametara debljine i načina namotavanja vlakana, čime je otvorena mogućnost primene u postupcima projektovanja posuda kao i eksploatacije. Rezultati istraživanja predstavljaju značajan doprinos ka unapređenju bezbednosti transporta i sigurnost tokom projektovanog veka upotrebe posuda.
Jeon and Park, 2025.	Pojedinačne posude	U radu je izvršena serija ispitivanja posuda Tip–2 namenjenih za transport i skladištenje komprimovanih gasova. Posude su ispitivane na ciklična opterećenja, punjenja i pražnjenja, pri različitim pritiscima i temperaturnim uslovima. Rezultati istraživanja prikazuju da je način montaže posuda i vezivanja u ramove od ključnog značaja na pojavu prslina na cilindričnom delu posuda u zoni ojačanja kompozitnim materijalima. Posude moraju biti tako postavljene i pričvršćenje da ne postoji mogućnost njihovog pomeranja ili oštećenja tokom transporta, prvenstveno izazvanih od oštrih ivica ili vijaka. Oštećenja od 2,8 mm izazvana vijcima na kompozitnim ojačanjima cilindričnog dela posuda, dovode do razaranja omotača usled cikličnih opterećenja. Istraživanje je sprovedeno u svrhu unapređenja bezbednosti transporta i sigurnosti primene posuda tokom projektovanog veka upotrebe. Takođe, istraživanje ima doprinos minimalizaciji rizika koji potiče od procesa proizvodnje do eksploatacije posuda, tj. nesavesnog ili nehotičnog rukovanja, pre svega u postupcima montaže posuda u transportne ramove.
Solazzi and Vaccari, 2022; Azeem et. al., 2022;	Pojedinačne posude	U radovima, kao doprinos postupcima izbora posuda pod pritiskom sa aspekta pouzdanosti i sigurnosti primene opisan je postupak procene kvaliteta posuda namenjenih za transport komprimovanih gasova. Istraživanja su obuhvatila posude izrađene od dve vrste kompozitnih materijala, staklenih i ugljeničnih vlakana, kao i posude izrađene od metalnih materijala. Postupkom je omogućena kvantifikacija različitih konstrukcionih rešenja, tehnologija i materijala izrade na masena iskorišćenja, radne pritiske i troškove nabavke. Integracijom postupka sa numeričkim analizama i savremenim softverskim alatima omogućena je procena naponskih stanja, kritičnih vrednosti pritisaka, debljina zida i dr. Rezultati prikazuju da posude izrađene od ugljeničnih vlakana imaju najbolji odnos mehaničkih svojstava i masenih parametara. S druge strane, posude izrađene od ugljeničnih vlakana imaju najveće troškove izrade/nabavke. U poređenju sa njima, troškovi izrade/nabavke posuda izrađenih od aluminijuma niži su za 64%, a čelika do 88%. Istraživanjima je omogućena kvantifikacija navedenih ključnih parametara, čime je otvorena mogućnost primene u postupcima izbora posuda, ali i u svrhu unapređenja bezbednosti i pouzdanosti primene posuda tokom projektovanog veka upotrebe. Takođe, ostvareni rezultati mogu doprineti i minimalizaciji rizika od otkaza tokom perioda eksploatacije, poput rizika od preopterećenja izazvanog od visokog pritiska, nesavesnog ili nehotičnog rukovanja i dr.
Wang et. al., 2020;	Vozila i nadgradnje	U radu sa aspekta bezbednosti i sigurnosti primene razmatrani su uslovi eksploatacije na pojavu isparavanja gasa kod nadgradnji namenjenih za transport i skladištenje prirodnog gasa. Istraživanje

		je obuhvatilo kriogene posude i rizike koji prate transportni proces, koje prouzrokuju temperaturni uslovi i vibracije koje se prenose na vozila i nadgradnje izazvane od stanja kolovoza. Integracijom navedenih parametara sa numeričkim analizama i savremenim softverskim alatima, omogućena je procena gubitaka gasa usled isparavanja. Postupak omogućava kvantifikaciju uticaja različitih temperaturnih opterećenja i brzina kretanja vozila na transportovane količine gasa, odnosno gubitke usled isparavanja. Rezultati prikazuju da na isparavanje gasa utiču konstrukciona rešenja izolacija posuda, održavanje i režim kretanja vozila. Naime, usled porasta temperature i brzine vozila, dolazi do porasta temperature gasa i vibracija koje se prenose sa transportnog vozila na nadgradnju, odnosno posudu sa utečnjenim prirodnim gasom. Takvi uslovi doprinose bržim gubicima gasa na prirubničkim mestima utakanja i istakanja. Osnovni doprinosi rada ogledaju se u smernicama za primenu posuda tokom projektovanog veka upotrebe u svrhu boljih iskorišćenja, unapređenja bezbednosti i sigurnosti. Takođe, ostvareni rezultati mogu doprineti i smanjenju rizika od požara usled curenja/isparavanja gasa tokom perioda eksploatacije, usled nesavesnog ili nehotičnog rukovanja.
Lasn and Echtermeyer, 2014; Mair, 2017; Mair et. al., 2021;	Vozila i nadgradnje	U istraživanjima kao doprinos bezbednosti i sigurnosti primene vozila i nadgradnji za transport komprimovanih gasova, razmatraju se rizici koji prate drumski transportni proces. Istraživanja su obuhvatila baterijske i MEGC nadgradnje kao i potencijalne rizike njihove primene na imovinu, zdravlje ljudi i životnu sredinu. Razmatrani su rizici i moguće posledice od otkaza transportnih vozila, posuda ili komponenti nadgradnji tokom perioda eksploatacije. U datom kontekstu obuhvaćena su i ciklična opterećenja punjenja i pražnjenja na strukturu posuda, posebno kroz primenu kompozitnih posuda kao i moguće posledice od otkaza po zdravlje ljudi i imovine. Takođe, prikazani su novi postupci procene potencijalnog rizika od otkaza, zasnovani na broju vozila i broju potrebnih vožnji za transport određenih količina gasa, kao i ukupnom vremenu potrebnom za realizaciju transportnog zadatka. Zajednički cilj istraživanja je unapređenje bezbednosti i sigurnosti primene vozila i nadgradnji namenjenih za transport gasova tokom perioda eksploatacije.
Meng et. al., 2024;	Vozila i nadgradnje	U okviru istraživanja, kao doprinos bezbednosti i sigurnosti skladištenja i transporta vodonika primenom baterijskih nadgradnji, razmatraju se posude pod pritiskom izrađene od kompozitnih materijala. Istraživanje je obuhvatilo dva konceptualna rešenja vratnog dela posuda izrađenih od polimernih materijala, koje su potpuno obložene kompozitnim materijalima. Primenom savremenog softvera i numeričke analize omogućena je procena naponskih stanja i kritičnih vrednosti pritisaka u kritičnim prelaznim zonama posuda. Rezultati prikazuju da posude izrađene sa dodatnom zazorom za prihvat prirubnice vratnog dela gasne instalacije značajno utiču na smanjenje napona. Osnovni doprinosi istraživanja ogledaju se u smernicama za izradu polimerne osnove posuda i geometrije vratnog dela sa ciljem unapređenja bezbednosti i sigurnosti primene posuda tokom projektovanog veka upotrebe. Takođe, ostvareni rezultati doprinose i minimalizaciji rizika od otkaza tokom perioda eksploatacije od nesavesnog ili nehotičnog rukovanja.

U okviru istraživanja, kao doprinos pouzdanosti i sigurnosti primene posuda pod pritiskom tokom projektovanog veka upotrebe, posebno se ističe primena mehanike loma. Naime, razvoj i primena mehanike loma, numeričkih analiza i savremenih uređaja za ispitivanja bez razaranja, omogućla je procenu integriteta i trenutnog stanja opreme, kao i neophodne radnje održavanja tokom projektovanog veka upotrebe posuda. Nadovezujući se na odredbe i ograničenja koja se odnose na konstrukciona rešenja vozila i nadgradnji, navedena u prethodnom poglavlju i pratećim odeljcima rada, u narednom poglavlju opisana su pogonska goriva, regulatorni propisi koji se odnose na goriva, izduvnu emisiju i prateće sisteme.

3.2 Pogonska goriva

Ubrzani razvoj privrede i privrednih aktivnosti kako na domaćem tako i na inostranom tržištu prati i kontinuirani razvoj drumskog transporta opasne robe, koji predstavlja ključni faktor u distributivnom lancu prvenstveno omogućavajući brzu, fleksiblinu i relativno efikasnu razmenu dobara. Poslednjih decenija razvoj drumskog transporta robe praćen je uporednim zahtevima koji se postavljaju pred proizvođače i korisnike vozila. Primarni zahtevi potiču od regulatornih propisa, pre svega sa aspekta unapređenja bezbednosti, smanjenja izduvne emisije i ublažavanja negativnih uticaja na životnu sredinu, ali i sa aspekta unapređenja efikasnosti vozila, kroz smanjenje troškova transporta, potrošnje goriva, izduvne emisije, prosečnog vremena transporta, boljih masenih iskorišćenja vozila, transporta većih količina robe i dr. U cilju realizacije navedenih zahteva u pravcu razvoja bezbednijeg, ekološki i ekonomski

održivog transporta, nameću se preispitivanja koje se sve vrste pogonskih energenata (goriva) mogu i smeju primeniti za pogon teretnih motornih vozila.

Polazeći od prethodno navedenog, posmatrano iz ugla proizvođača vozila primarni zahtevi koji se postavljaju pred pogonska goriva, su: visoka toplotna moć, dobro i lako obrazovanje smeše u svim radnim uslovima, velika brzina sagorevanja, sagorevanje bez ostataka i bez toksičnih komponenti, otpornost ka detonacionom sagorevanju (oto motori), skolnost ka samozapaljenju (svojstveno za dizel motore), hemijska stabilnost, pogodnost za rukovanje (transport, skladištenje i upotrebu), dostupnost, niska cena i dr. (Tomić i Petrović, 2000; Popović i Miljić, 2018). Nadovezujući se na zahteve koji se postavljaju pred pogonske energente, trenutno u svetu su i dalje najzastupljenija tečna i gasna ugljovodonična goriva. Međutim, napretkom tehnologije i razvojem tržišta, prisutni su i drugi pogonski energenti, poput alkohola, vodonika, elektropogona i dr. (Mićić, 2020; Philp, 2020; Martínez, 2025). U okviru navedenog konteksta u nastavku rada opisana su najzastupljenija pogonska goriva kod teretnih vozila.

Benzin predstavlja jedno od najrasprostranjenijih tečnih ugljovodoničnih goriva za pogon motornih vozila. Sastav goriva (parafina (alkana), naftena (cikloalkana), zatim aromata benzena, toluena i dr.), prvenstveno zavisi od procesa prerade i ležišta nafte (Mićić, 2020; Philp, 2020). Prema klasifikaciji opasnih materija, klasifikuje se u zapaljive tečne materije i označava se slovnobrojčanom oznakom UN 1203 (ECE 352). Prema broju atoma ugljenika svrstava se u lake ugljovodonike (između 5 i 9 atoma ugljenika u molekulu), čija je temperatura isparavanja u opsegu 50 do 200 °C. U vozilima se skladišti u tečnom stanju u namenskim rezervoarima. Donja toplotna moć benzina iznosi oko 47 MJ/kg, a gustina oko 0,737 kg/l na temperaturi 15 °C i pritisku od 1,01325 bar (Philp, 2020; Martínez, 2025). Donja toplotna moć predstavlja količinu toplote koja se dobije prilikom potpunog sagorevanja jednog kg ili m^3 goriva, za iste uslove pre i posle sagorevanja, a produkt sagorevanja – vodena para, nalazi se u gasovitom stanju (Popović i Miljić, 2018; Milivojević, 2023; Mitrović, 2024). Važne karakteristike goriva za oto motore su dobra isparljivost i otpornost prema detonacionom sagorevanju. Mera otpornosti goriva prema nekontrolisanom detonacionom sagorevanju definisana je oktanskim brojem, koji zavisi od udela komponenata izooktana (C_8H_{18}) i heptana (C_7H_{16}). Procentualni udeo izooktana (koji ima veliku otpornost prema detonacionom sagorevanju) u odnosu na udeo heptana (koji nema otpornost prema detonacionom sagorevanju) definiše oktanski broj goriva. Viši oktanski broj veća otpornost prema samopaljenju i detonacionom sagorevanju. Vrednosti oktanskog broja kod benzina iznose od 95 do 100 oktana, kod tečnog naftnog gasa oko 110, dok kod prirodnog gasa iznosi oko 120 oktana (Philp, 2020; Milivojević, 2023; Martínez, 2025). Prednosti benzina, pre svega u odnosu na dizel, su: rad sa homogenom smešom, dobro i lako obrazovanje smeše u svim radnim uslovima, velika brzina i potpunije sagorevanje, niža izduvna emisija (pogotovo čestičnih materija), relativno niža cena i dr. S druge strane kao osnovni nedostaci se navode, veća potrošnja goriva, viša temperatura sagorevanja i dr. Primenjuje se uglavnom kod lakih teretnih i putničkih vozila, ali u zavisnosti od tržišta, u manjem procentu prisutna je i primena kod teških teretnih vozila (Bae, Rindt, Mitra and Ritchie, 2022; Bae, Rindt, Mitra and Ritchie, 2024).

Dizel predstavlja najrasprostranjenije gorivo za pogon teških teretnih vozila. Dobija se kao teži destilat sirove nafte, a njegov sastav je kao i kod benzina u zavisnosti od ležišta nafte, primenjene tehnologije i procesa prerade. Pored navedenih tehnologija u manjem obimu prisutne su tehnologije dobijanja dizela iz biljnjih ulja (biodizel) ili iz prirodnog gasa (sintetički dizel) (Mićić, 2020; Martínez, 2025). Prema klasifikaciji opasnih materija, klasifikuje se u zapaljive tečne materije i označava se slovnobrojčanom oznakom UN 1202 (ECE 352). Prema

broju atoma ugljenika svrstava se u teže ugljovodonike (između 12 i 17 atoma ugljenika u molekulu), čija je temperatura isparavanja u opsegu 220 do 350 °C. U vozilima, skladišti se u tečnom stanju u namenskim rezervoarima. Donja toplotna moć dizela iznosi oko 43 MJ/kg, a gustina oko 0,830 – 0,846 kg/l na temperaturi 15 °C i pritisku od 1,01325 bar (Tomić i Petrović, 2000; Popović i Miljić, 2018; Milivojević, 2023; Martínez, 2025). U odnosu na benzin i gasovita goriva, odlika dizel goriva je upaljivost, tj. sklonost ka upaljenju i temperatura samoupaljenja. Temperatura samoupaljenja smeše usled kompresione energije, kod dizel goriva iznosi oko 530 °C. Mera sklonosti ka upaljenju definisana je cetanskim brojem, koji je u zavisnosti od udela komponenata cetana ($C_{16}H_{34}$) i α–metilnaftalina ($C_{11}H_{10}$) u gorivu. Vrednosti cetanskog broja goriva utvrđuju se eksperimentalno, pomoću specijalnog motora, poređenjem sklonosti ka upaljenju ispitivanog goriva sa referentnim gorivom, tj. procentualni udeo cetana u smeši sa α–metilnaftalinom referentnog goriva, koji ima ekvivalentnu sklonost ka samoupaljenju sa ispitivanim gorivom, definiše cetanski broj (Tomić i Petrović, 2000). Osnovne prednosti dizela su: rad sa heterogenom smešom, veća energetska efikasnost, niža specifična potrošnja goriva koja je naročito izražena pri delimičnim opterećenjima i radu sa siromašnom smešom i dr. Kao osnovni nedostaci primene dizela navode se nepovoljne ekološke karakteristike, pogotovo emisija čestičnih materija, buka i dr. Troškovi proizvodnje konvencionalnih tečnih goriva (benzina i dizela) u zavisnosti su od tržišta, tipa ležišta, primenjenih tehnoloških procesa i dr. U slučaju benzina, u proseku troškovi proizvodnje se kreću u opsegu od 0,36 do 0,45 €/l, s druge strane troškovi proizvodnje dizela, težeg destilata nafte, kreću se u opsegu od 0,40 do 0,50 €/l (PR, 2025).

Posmatrano iz ugla razvijenosti infrastrukture i privredne aktivnosti, posebno kod država gde je najzastupljenije dizel gorivo, gasovita goriva i dalje predstavljaju najperspektivniju alternativu za pogon teretnih motornih vozila (Nylund and Wenstedt, 2019; Van Grinsven, Otten, Van Den Toorn, Van Der Veen, Király and Van den Berg, 2021). Najzastupljenija gasovita goriva koja se koriste za pogon teretnih motornih vozila su tečni naftni gas i prirodni gas. Razlike između tečnog naftnog gasa i prirodnog gasa su u hemijskom sastavu, načinu proizvodnje i skladištenja, kao i u posebnim zahtevima koji se odnose na upotrebu, instalaciju i rezervoare u vozilima. Gasovita goriva dobijaju se prirodnim putem, direktno iz zemlje (naftne bušotine, ležišta prirodnog gasa, i dr.), u procesima prerade nafte ili drugih sirovina, najčešće biomase (Mićić, 2020; Martínez, 2025). Osnovne odlike gasovitih goriva su dobro i lako obrazovanje smeše (reaktanti koji stupaju u interakciju su u gasovitom stanju, gorivo (propan, smeša propana i butana, metan i dr.) i oksidator (kiseonik iz vazduha)), visok oktanski broj, ravnomerno sagorevanje, sagorevanje bez ostataka, dobra otpornost ka detonacionom sagorevanju, povoljnija izduvna emisija nego kod konvencionalnih goriva (dizel i benzin), ekonomski prihvatljiva cena i dr. S druge strane, kao nedostaci primene ovih goriva navode se, regulatorne odredbe sa stanovišta bezbednosti i primene eksplozivnih i zapaljivih pogonskih energenata, koji zahtevaju posebnu instalaciju na vozilima, otežana manipulacija i skladištenje, povećanje mase vozila i dr. (Rakić, 2008; Martínez, 2025).

Tečni naftni gas je fosilno gorivo koje se sastoji od mešavine ugljovodonika, pretežno propana (C_3H_8) i butana (C_4H_{10}), ali sadrži i manje količine drugih ugljovodonika poput propilena (C_3H_6), butilena (C_4H_8) i dr. Dobija se industrijskom preradom, izdvajanjem iz naftnih derivata ili iz prirodnog gasa. Tečni naftni gas važi za visoko zapaljiv gas, u zavisnosti od sastava gasa, prema klasifikaciji opasnih materija (robe) označava se slovnobrojčanim oznakama UN 1011 (Butan), UN 1075 (Petrolej), UN 1965 (Smeše gasovitih ugljovodonika), UN 1969 (Izo–butan) i UN 1969 (Propan) (ECE 352). U vozilima, skladišti se u tečnom stanju u namenskim rezervoarima na radnom pritisku od 1,5 MPa. Donja toplotna moć tečnog naftnog gasa, na

temperaturi 15 °C i pritisku od 1,01325 bar, iznosi oko 46 MJ/kg, a gustina 0,537 kg/l (Mićić, 2020; Philp, 2020; Milivojević, 2023; Martínez, 2025).

Prirodni gas poznat i kao gas sa visokim sadržajem metana (CH_4), sadrži i manje količine drugih ugljovodonika, poput etana (C_2H_6), propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}), kao i primesa ugljen–dioksida (CO_2), azota (N_2) i dr. Dobija se ekstrakcijom direktno iz zemlje ili industrijskom preradom, preradom naftnih derivata ili drugih sirovina (biogas, uljni škriljci i dr.). Udeo osnovnih komponenti prirodnog gasa varira od tipa ležišta i načina ekstrakcije, odnosno načina prerade i izdvajanja (navedeno u poglavlju 6) (Speight, 2018; Kidnay et. al., 2019; Mićić, 2020; Martínez, 2025). Prirodni gas važi za visoko zapaljiv i eksplozivan gas i prema klasifikaciji opasnih materija (robe) označava se slovnobrojčanom oznakom UN 1971 (ECE 352). Način skladištenja prirodnog gasa u zavisnosti je od njegovog agregatnog stanja, tj. može se skladištiti u komprimovanom stanju u posudama na visokim radnim pritiscima oko 20/25 MPa, tečnom stanju – primenom kriogenih posuda na radnim pritiscima oko 1,6 MPa i temperaturi oko –162 °C, ali i u adsorbovanom obliku primenom posuda sa adsorbentom (najčešće aktivnim ugljem) na radnim pritiscima oko 5 MPa. Donja toplotna moć prirodnog gasa iznosi 31–36 MJ/m^3, a gustina oko 0,711 kg/m^3 na temperaturi 15 °C i pritisku od 1,01325 bar (Speight, 2018; Kidnay et. al., 2019; Ivković, 2020; Martínez, 2025).

Prednosti gasnih goriva u odnosu na dizel gorivo, su: rad sa homogenom smešom, manja temperatura sagorevanja (pogotovo kod prirodnog gasa, što direktno utiče na emisiju azotnih oksida), potpunije sagorevanja (direktno utiče na emisiju nesagorelih ugljovodonika), visok oktanski broj (u slučaju prirodnog gasa 120 oktana) direktno utiče na povećanje efikasnosti vozila i dr. (Tomić i Petrović, 2000; Rakić, 2008; Popović i Miljić, 2018; Ivković, 2020). Kao osnovna ograničenja gasnih goriva, pre svega prirodnog gasa, su još uvek nedovoljno razvijena infrastruktura, broj stanica za snabdevanje gorivom, kao i tehnološki uslovi za boce/rezervoare u kojima se skladišti prirodni gas (zakonski zahtevi i ograničenja za posude pod pritiskom ili kriogene posude, a koji se odnose na visoke radne pritiske, ograničen radni vek boca/rezervoara, preventivne preglede i dr.). Troškovi proizvodnje prirodnog gasa i tečnog naftnog gasa u zavisnosti su od tržišta, tipa ležišta, primenjenih tehnoloških procesa i dr. U slučaju prirodnog gasa, u proseku troškovi proizvodnje se kreću u opsegu od 0,09 do 0,160 €/kg, s druge strane troškovi proizvodnje tečnog naftnog gasa kreću se u opsegu od 0,112 do 0,240 €/kg (Del Pozo, Cloete and Álvaro, 2022; FGE, 2024; EIA, 2025). U navedenom kontekstu ograničenja, jedan od razloga zastupljenije primene tečnih ugljovodoničnih goriva za pogon motornih vozila, poput dizela i benzina, upravo je razvijenija infrastruktura i tehnološki uslovi koji prate procese manipulacije, skladištenja i transporta. S druge strane, klimatske promene prouzrokovane raznim uticajima, među kojima se posebno izdvaja sagorevanje konvencionalnih fosilnih goriva, nameću preispitivanja koje se sve vrste pogonskih energenata mogu primeniti u drumskom transportnom sektoru. Pritom imajući u vidu i kontinuirano zaoštravanje zakonskih propisa, pre svega propisa kojima se definišu dozvoljene granične vrednosti emisije izduvnih gasova kod vozila, pravci razvoja drumskog transportnog sektora usmeravaju se na ekoloških prihvatljivije energente. Poslednjih decenija intenzivno se radi na iznalaženju novih rešenja za pogon teretnih vozila, od koji su najistaknutija gasna goriva (tečni naftni gas i prirodni gas), zatim vodonik i elektropogon, prvenstveno zbog manje ili gotovo nepostojeće emisije zagađujućih materija u odnosu na konvencionalna goriva.

Vodonik, energetski vektor budućnosti, dobija se iz različitih izvora (fosilnih goriva, biomase i vode) primenom različitih tehnoloških procesa (gasifikacijom uglja, hidrotretiranjem nafte i katalitičkim tretiranjem prirodnog gasa, elektrolizom vode, termohemijskim razlaganjem vode

i dr.). Osnovne odlike vodonika su: dobro i lako obrazovanje smeše, velika brzina sagorevanja, ravnomerno sagorevanje bez ostataka, odnosno produkt sagorevanja vodonika je vodena para (Todorović, 2004; Konjević, 2005; Ivković, 2020; Martínez, 2025). Vodonik je visoko zapaljiv i eksplozivan gas. Prema klasifikaciji opasnih materija, u zavisnosti od agregatnog stanja i načina skladištenja, označava se slovnobrojčanim oznakama UN 1049 u komprimovanom stanju, oznakom UN 1966 za duboko rashlađeno – tečno stanje i oznakom UN 3468 za čvrsto stanje, u obliku hidrida metala (ECE 326 i 352). Tehnologija skladištenja vodonika u zavisnosti je od agregatnog stanja i može se skladištiti u komprimovanom stanju u posudama na izrazito visokim radnim pritiscima od 35 do 70 MPa, tečnom stanju u kriogenim posudama na temperaturi od oko –250 °C i radnim pritiscima od 1 do 2 MPa ili u čvrstom stanju u obliku hidrida metala. Donja toplotna moć vodonika, na temperaturi 15 °C i pritisku od 1,01325 bar, iznosi oko 120 MJ/kg, a gustina oko 0,09 kg/l. (Farias, Barreiros, Silva, Casazza, Converti and Sarubbo, 2022; Martínez, 2025; Simanullang, 2025).

Pored gore navedenih odlika, ključna prednost vodonika u odnosu na ostala goriva je gotovo nepostojeća izduvna emisija, ali njegov ukupni uticaj na životnu sredinu ipak zavisi od načina dobijanja vodonika. Posmatrano sa ekološkog aspekta, procesi zasnovani na elektrolizi vode su najprihvatljiviji za proizvodnju vodonika (Todorović, 2004; Konjević, 2005; Popović i Miljić, 2018; Farias et. al., 2022; Martínez, 2025; Simanullang, 2025). Troškovi proizvodnje vodonika u zavisnosti su od izvora i primenjenih tehnoloških procesa. S tim u vezi, najniži troškovi proizvodnje vodonika su iz fosilnih goriva i prirodnog gasa i kreću se u opsegu oko 1 do 2 €/kg, dok u slučaju proizvodnje zasnovanom na procesu elektrolize vode troškovi su u opsegu od 3 do 7 €/kg (IEA, 2021). Takođe, bitno je napomenuti da vodonik i pored navedenih odlika, još uvek nije značajnije zastupljen kao pogonsko gorivo za motorna vozila. Niska zastupljenost proizilazi iz uslova skladištenja i transporta, a koji se odnose na tehnološke zahteve za posude, poput visokih troškova proizvodnje vodonika, posuda i preteće opreme, visoke radne pritiske, relativno male količine vodonika i dr., a koji se reflektuju na uslove eksploatacije, radijus kretanja vozila i dr. Važno je istaći i bezbednosne aspekte, tj. da se radi o visoko zapaljivom i eksplozivnom gasu. Primena vodonika, pored pogonskog goriva za motore sa unutrašnjim sagorevanjem, ogleda se i kroz proizvodnju električne energije za pogon vozila, primenom tehničkim rešenja gorivnih ćelija. Princip rada gorivnih ćelija zasnovan na kontrolisanom pretvaranju hemijske energije goriva (vodonika) i oksidatora (kiseonika iz vazduha) u električnu energiju, koja se dalje koristi za pogon elektromotora vozila.

Trenutno u svetu su prisutna brojna izvođenja (verzije) gorivnih ćelija. Shodno tome, u zavisnosti od primenjenog goriva (elektrolita), razlikujemo i tipove gorivnih ćelija. Najrasprostranjenije su vodonične gorivne ćelije za pogon motornih vozila sa propusnom membranom samo za pozitivne jone (protone), pritom zadržavajući elektrone i na taj način omogućavajući odvijanje anodne (u prisustvu katalizatora oslobađajući protone i elektorne) i katodne (u prisustvu kiseonika iz vazduha formiraju vodu) reakcije. Pored navedenog, prisutne su gorivne ćelije koje koriste druge vrste goriva, poput alkohola ili metana. Princip rada zasnovan je na primeni propusne membrane i direktnom razlaganju alkohola (najčešće metanola), tj. omogućavajući nesmetano odvijanje anodne (u prisustvu katalizatora oslobađajući protone vodonika i elektorne) i katodne (u prisustvu kiseonika formiranje ugljen–dioksida i vode) reakcije. Osnovna razlika između primene alkohola ili metana kao goriva za proizvodnju električne energije u odnosu na vodonik, je emisija CO_2 (Todorović, 2004; Konjević, 2005; Ivković, 2020).

Elektropogon vozila poslednjih decenija dobija sve više na važnosti, pre svega, kao jedan od odgovora na smanjenje izduvne emisije gasova i njihovog uticaja na zagađenje vazduha i efekat

staklene bašte izazvanih upotrebom fosilnih goriva. Važnosti elektropogona doprinose i geopolitički uticaji vodećih država sveta i njihova suverenost u upravljanju resursima nafte i prirodnog gasa, kao i brojni zakonski propisi, koji dovode do postepenog uvođenja elektropogona i prelaznih rešenja, poput hibridnog pogona. Princip rada elektropogona zasniva se na primeni električne energije dobijene iz gorivnih ćelija, baterija ili superkondenzatora za pokretanje jednog ili više elektromotora. U zavisnosti od koncepcije gradnje, trenutno na tržištu prisutna su teretna vozila sa hibridnim pogonom, pogonom sa gorivnim ćelijama i pogonom na baterijama (Huang, Surawski, Organ, Zhou, Tang and Chan 2019; Ivković, 2020; Mordor Intelligence, 2020; De las Nieves Camacho, Jurburg and Tanco, 2022; Bae et. al., 2022, 2024).

Hibridna koncepcija pogona *(engl. Hybrid Electric Vehicle)* predstavlja korišćenje dva ili više različitih vidova energije za pogon vozila, najčešće se izvodi u kombinaciji motora sa unutrašnjim sagorevanjem i elektromotora, tj. za pogon vozila koristi se mehanička energija dobijena od hemijske energije goriva i električne energije iz baterija. Prisutna su različita konceptualna rešenja hibridnog pogona, dok se osnovne razlike prvenstveno ogledaju u konfiguracijama pogona, povećanju kapaciteta baterija i mogućnostima punjenja (punjenje sa spoljnog izvora ili rekuperacijom prilikom usporenja) i dr. Prednosti ove koncepcije u odnosu na koncept pogona vozila na konvencionalna goriva, primenom motora sa unutrašnjim sagorevanjem, su u proseku od 20 do 50% manja potrošnja goriva i emisija ugljen–dioksida. Nedostaci ovog koncepta su cena nabavke vozila koja zavisi od tipa i broja baterija, složenost održavanja, povećanje mase vozila, rizik od pregrevanja baterija i dr. (Huang et. al., 2019; Ivković, 2020). Primenjuje se uglavnom kod putničkih vozila i lakih teretnih vozila, ali u zavisnosti od tržišta, prisutna je i primena kod teških teretnih vozila (Huang et. al., 2019; Mordor Intelligence, 2020; Bae et. al., 2022, 2024)

Koncepcija pogona sa gorivnim ćelijama *(engl. Fuel Cell Electric Vehicle)*, kako je navedeno u delu gde je opisan vodonik, zasnovana je na pretvaranju gorivne energije (najčešće vodonika) pomoću hemijske reakcije u električnu energiju, tj. dobijena električna energija iz jedne ili više gorivnih ćelija putem elektromotora pretvara se u mehaničku energiju za pogon vozila. Kao i kod hibridnog pogona, prisutna su različita konceptualna rešenja koja se ogledaju u konfiguracijama pogona, različitim vrstama goriva, broju gorivnih ćelija u cilju povećanja autonomije vozila, mogućnost dopunjavanja–rekuperacijom prilikom usporenja i dr. Ključne prednosti u odnosu na vozila sa hibridnom koncepcijom pogona, su izrazito niska izduvna emisija (u slučaju vodonika produkt hladnog sagorevanja je vodena para), veća energetska efikasnosti i gotovo nečujan rad. Osnovni nedostaci koncepcije pogona zasnovanog na gorivnim ćelijama, su: cena nabavke vozila, nedovoljna rasprostranjenost i troškovi proizvodnje vodonika, visoki pritisci skladištenja goriva (vodonika), rizik od požara i dr. U zavisnosti od tržišta, prisutna je primena kod putničkih, lakih teretnih vozila i teških teretnih vozila (Todorović, 2004; Konjević, 2005; Ivković, 2020; De las Nieves Camacho, Jurburg and Tanco, 2022).

Koncepcija pogona sa baterijama *(engl. Battery Electric Vehicle)* zasnovana je na pretvaranju električne energije iz baterija, putem elektromotora, u mehaničku energiju za pogon vozila. U literaturi vozila sa koncepcijom pogona samo sa baterijama, često se nazivaju baterijska električna vozila ili elektro vozila (Ivković, 2020; De las Nieves Camacho, Jurburg and Tanco, 2022; Bae et. al., 2022, 2024). Trenutno na svetskim tržištima prisutna su različita konceptualna rešenja pogona sa baterijama, dok se osnovne razlike ogledaju u konfiguraciji pogona, vrsti elektromotora (asihroni indukcioni AC ili sinhroni DC motor sa stalnim/permanentnim magnetom), zatim broju, tipu i kapacitetu baterija, mogućnostima punjenja (punjenje sa spoljnog izvora i rekuperacijom prilikom usporenja), primeni

superkondenzatora i dr. U zavisnosti od koncepcije rešenja obezbeđenja električne energije za pogon vozila, razlike između gorivnih ćelija, baterija i superkondenzatora su te što gorivne ćelije koriste gorivo za generisanje električne energije, dok se baterije i superkondenzatori koriste za skladištenje. Princip rada baterija zasniva se na pretvaranja električne energije u hemijsku (kada se baterija puni sa spoljnog izvora ili rekuperacijom prilikom usporenja), odnosno naknadnog pretvaranja hemijske energije u električnu (rad elektromotora). S druge strane u slučaju superkondenzatora skladištenje električne energije odvija se elektrostatički, bez hemijske reakcije, na taj način omogućavajući skladištenje velikih količina energije. U praksi često se primenjuju u kombinaciji sa baterijama. Trenutno na tržištu za pogon električnih vozila prisutna su brojna izvođenja baterija, a razlike se prvenstveno ogledaju u primenjenim materijalima, ceni, ciklusima punjenja, kapacitetu baterije, specifičnoj snazi W/kg, masi, radnom veku i svakako uticaju na životnu sredinu. U skladu sa navedenim, najzastupljenije su litijum–jonske, litijum–polimerske, nikl–metal hibridne, nikl–kadijumske i dr. (Ivković, 2020; Bae et. al., 2022, 2024). U osnovi, prednosti električnih vozila u odnosu na vozila sa konvencionalnim pogonom i hibridnim pogonom, su gotovo nepostojeća izduvna emisija (prilikom razmatranja vozila neophodno je uzeti u obzir i način dobijanja električne energije za punjenje baterija, kao i tehnologiju proizvodnje baterija i dr.), veća efikasnosti i niži troškovi eksploatacije, nečujan rad i dr. Nasuprot navedenom, ključni nedostaci su visoka nabavna cena vozila, ograničena infrastruktura, vreme punjenja i autonomija kretanja vozila, rizik od pregrevanja baterija i požara.

Alkoholna goriva, metanol (CH_3OH) i etanol (C_2H_5OH), dobijaju se industrijskom preradom, hidrogenizacijom ugljen–monoksida (CO) i vodonika (H_2) ili preradom šećera ili skroba. Alkoholna goriva prema klasifikaciji opasnih materija (robe), klasifikuju se u zapaljive tečne materije i označavaju se slovnobrojčanom oznakama, za metanol UN 1230, odnosno za etanol UN 1170. U slučaju gorivne smeše benzina i etanola oznaka je UN 3475 (ECE 352). Proces skladištenja je kao kod ostalih konvencionalnih goriva, je u tečnom stanju u namenskim rezervoarima. Donja toplotna moć etanola, na temperaturi 15 °C i pritisku od 1,01325 bar, iznosi oko 28 MJ/kg, a gustina oko 0,789 kg/l, dok u slučaju metanola donja toplotna moć i gustina iznose oko 20 MJ/kg i 0,791 kg/l. Osnovne odlike alkoholnih goriva su: dobro i lako obrazovanje smeše u svim radnim uslovima, mogućnost mešanja sa benzinom i formiranja gorivne smeše u procentualnom odnosu oko 20%, visok oktanski broj (preko 100 za gorivne smeše), ravnomerno sagorevanje, dobra otpornost ka detonacionom sagorevanju, povoljnija izduvna emisija nego kod konvencionalnih goriva, dizel i benzina. Takođe, kao prednosti se navode: rad sa homogenom smešom, mogućnost rada sa siromašnijom smešom, velika brzina sagorevanja, potpunije sagorevanje, niža izduvna emisija, pogotovo čestičnih materija i dr. Međutim, bitno je napomenuti da alkoholna goriva za širu primenu još uvek nisu ekonomski prihvatljiva, pre svega zbog nedovoljnih količina, ali i zbog manje toplotne moći goriva i korozivnih svojstava goriva (Tomić i Petrović, 2000; Popović i Miljić, 2018; Martínez, 2025). U zavisnosti od tržišta, primenjuju se uglavnom kod lakih teretnih i putničkih vozila, ali u manjem procentu prisutna je i primena kod teških teretnih vozila (Yüksel and Yüksel, B., 2004; Jegan, Chitra and Glivin, 2021; Bae et. al., 2022, 2024). Troškovi proizvodnje alkohola su varijabilni i u zavisnosti su od tržišta, primenjenih tehnoloških procesa, dostupnosti sirovina i dr. U slučaju etanola troškovi proizvodnje se kreću u opsegu oko 0,30 do 1,40 €/l, dok u slučaju metanola troškovi proizvodnje oko 0,60 €/l (Aui, Wang and Mba-Wright, 2021; Pratschner, Radosits, Ajanovic and Winter, 2023; Hoey, Clark, Webb and Lynd, 2025).

Uzimajući u obzir prethodno navedeno sa razvojem privrede i infrastrukture, i narednih decenija pogonski energenti teških teretnih vozila zasnivaće se na primeni konvencionalnih dizel goriva i gasovitih goriva. U slučaju alkoholnih goriva, elektropogona i vodonika koji

poslednjih decenija dobijaju sve više na važnosti, njihovo potpuno uvođenje je još uvek neizvesno. Uprkos brojnim prednostima sa ekološkog aspekta, uvođenje je praćeno brojnim ograničenjima po pitanju bezbednosti, pre svega mogućim rizicima od požara u postupcima manipulacije, skladištenja i dr. (Brecher, Epstein and Breck, 2015; Lof, MacKinnon, Martin and Layzell, 2020; Noto and Mostofi, 2023). S obzirom na prethodno analizirane pogonske energente, u nastavku rada u Tabeli 10 navedena je procentualna zastupljenost energenata koji se koriste za pogon teških teretnih vozila u Evropskoj uniji, Sjedinjenim Američkim Državama (SAD), Narodnoj Republici Kini (NRK), dalje u tekstu Kina i Republici Srbiji. Navedena tabela sistematizuje procentualnu zastupljenost: dizela, benzina, prirodnog gasa, tečnog naftnog gasa, elektropogona (koncepcija pogona sa baterijama i sa gorivnim ćelijama), hibridne koncepcije pogona, alkohola i ostalih nestandardnih i manje zastupljenih pogonskih energenata na različitim tržištima.

Tabela 10. Zastupljenost pogonskih energenata kod teretnih vozila na različitim tržištima

Tržište	Pogonski energent			
	Dizel	Benzin	Prirodni gas	Tečni naftni gas
Evropska unija	96%	0,7%	0,8%	0,1%
Sjedinjene Američke Države	80,3%	15,3%	3,2%	0,4%
Kina	80%	0,3%	11,2%	N.P
Republika Srbija	>96%	N.P	0,2%	N.P

Tržište	Pogonski energent			
	Elektropogon[a]	Hibridni pogon	Alkoholna goriva[b]	Ostala[c]
Evropska unija	0,1%	0,06%	0,01%	2,23%
Sjedinjene Američke Države	0,1%	0,1%	0,5%	0,1%
Kina	8%	0,3%	N.P	0,2%
Republika Srbija	N.P	N.P	N.P	N.P

[a]Vrednosti obuhvataju vozila sa pogonom na baterije i gorivne ćelije.
[b]Vrednosti obuhvataju vozila sa pogonom na metanol i etanol.
[c]Vrednosti obuhvataju nestandardna i manje zastupljena goriva.

N.P Nisu dostupni podaci.

Izvori:
[1] Bae et. al., 2024. Fleet operator perspectives on alternative fuels for heavy-duty vehicles. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.01.023;
[2] Vehicles on European roads, 2025: https://www.acea.auto/files/ACEA-Report-Vehicles-on-European-roads-.pdf;
[3] U.S. government road vehicle fleet, 2023: https://www.statista.com;
[4] Road vehicle fleet by vehicle category and fuel type, 2025: https://w3.unece.org/;
[5] Heavy-duty vehicles in China, 2025: https://wwwen.ipe.org.cn/ICCT/HeavyDutyVehicle.aspx;
[6] Republički zavod za statistiku Srbije, 2025: https://www.stat.gov.rs/sr-latn/oblasti/saobracaj-i-telekomunikacije/registrovana-vozila.

Sprovedena analiza ukazuje da su i dalje za pogon teških teretnih vozila u Evropskoj uniji, Sjedinjenim Američkim državama i Republici Srbiji najzastupljenija komercijalna ugljovodonična goriva. U Evropskoj uniji od ukupnog broja registrovanih teretnih vozila, najveću zastupljenost od 96% ima konvencionalno dizel gorivo, dok benzin, prirodni gas i tečni naftni gas čine oko 1,6% od ukupnog broja. Vozila sa nultom ili izrazito niskom izduvnom emisijom, vozila sa elektropogonom (obuhvaćene koncepcije pogona sa baterijama i sa gorivnim ćelijama) kao i hibridna vozila, čine oko 0,2% u ukupnoj strukturi registrovanih teretnih vozila. Situacija je nešto drugačija u Sjedinjenim Američkim Državama, gde konvencionlni dizel predstavlja najzastupljenije pogonsko gorivo sa udelom oko 80% od ukupnog broja registrovanih teretnih vozila, zatim slede benzin, koji je znatno zastupljeniji nego u Evropi sa udelom od oko 15%, gasovita goriva i alkohol. U slučaju gasovitih goriva, prirodni gas ima veću zastupljenost sa udelom od oko 3%, dok s druge strane vozila sa pogonom na tečni naftni gas imaju udeo od 0,4%. Takođe, primetna je i primena alkoholnih goriva, pre svega etanola, koji ima nešto veću zastupljenost od tečnog naftnog gasa, sa udelom od 0,5%. Nasuprot tome, u Evropskoj uniji udeo alkoholnih goriva je zanemarljiv.

U slučaju Kine, kao i na tržištima Evropske unije i Sjedinjenih Američkih Država, trenutno najzastupljenije pogonsko gorivo je dizel sa udelom od 80%, zatim slede prirodni gas sa udelom od oko 11%, koji je znatno zastupljeniji nego u Evropi i Sjedinjenim Američkim Državama, elektropogon, hibridni pogon, benzin i dr. Poredeći zastupljenost pogonskih energenata na tržištu Kine sa tržištem Sjedinjenih Američkih Država, gde je benzin posle dizela najzastupljeniji pogonski energent, primetan je smer u kome se razvija drumski trasportni sektor Kine. Pored navedenog, udeo vozila sa nultom ili izrazito niskom izduvnom emisijom iznosi 8%, što predstavlja odlučan korak ka smanjenju upotrebe fosilnih goriva, odnosno izduvne emisije. Situacija u Republici Srbiji po pitanju zastupljenosti pogonskih energenata dosta je heterogenija. Naime najzastupljeniji pogonski energent kod teretnih vozila je dizel gorivo sa preko 96%, dok je prirodni gas zastupljen sa udelom od oko 0,2%. Važno je istaći da se podaci za udeo prirodnog gasa odnose na vozila koja su fabrički proizvedena i/ili naknadno prepravljena vozila.

Podaci iz Tabele 10. ukazuju da se i pored značajnog zalaganja i interesovanja za nove pogonske energente, dizel i dalje smatra osnovnim pogonskim gorivom za teška teretna vozila, dok se tranzicija ka drugim rešenjima odvija postepeno u skladu sa ekonomskim i tehnološkim mogućnostima država. U slučaju Republike Srbije jedno od mogućih rešenja za smanjenje negativnog uticaja drumskog transportnog sektora na životnu sredinu, za sada, je postepeno uvođenje prirodnog gasa kao energenta za pogon teških teretnih vozila, što odgovara jednom od strateških pravaca razvoja energetike (Strategija, 2024). Bitno je naglasiti da se u Strategiji razvoja razmatraju i mehanizmi za brzinu sprovođenja energetske tranzicije, koji su zasnovani na primeni poreskih modela kojima se postepeno oporezuje emisija izduvnih gasova koji doprinose stvaranju efekta staklene bašte. S tim u vezi, deo ovog rada je i razvoj modela procene troškova emisije izduvnih gasova kod vozila namenjenih za transport komprimovanih gasova, sa aspekta unapređenja efikasnosti vozila, kroz smanjenje potrošnje goriva i transporta većih količina gasa (robe) po jednoj vožnji.

3.2.1 Regulatorni kontekst – pogonska goriva

Polazeći od prethodno navedenih zahteva koji se postavljaju pred proizvođače teretnih vozila, a koji se odnose na smanjenje izduvne emisije i ublažavanje negativnih uticaja na životnu sredinu uz istovremeno podizanje efikasnosti vozila, prilikom projektovanja vozila za transport opasne robe, pored navedenih zahteva, poseban akcenat je na bezbednosti. Kako je navedeno u uvodnom delu ovog rada i prethodnim poglavljima, konstrukcija vozila za transport opasne robe mora biti tako projektovana i izvedena da obezbeđuje pouzdanost i sigurnost svih komponenti, sistema i vozila u celini tokom projektovanog radnog veka vozila, kao i između obaveznih redovnih kontrola. Regulatorni kontekst koji se odnosi na konstrukciju vozila, u zavisnosti od namene vozila (oznaka vozila prema pododeljku 9.1.1.2), dat je u Tabeli 11. Drugim rečima, u tabeli je sistematizovan odnos između oznake vozila prema nameni i zahteva koji se odnose na prevenciju rizika od pojave požara, navedenih u delu 9 Sporazuma (ECE 326 i 352). Zahtevi koji se odnose na prevenciju rizika od požara obuhvataju rezervoare za gorivo (boce ili posude pod pritiskom), pogonske agregate, izduvni sistem, pogonska goriva i dr., a njihova primena na pojedine oznake vozila u tabeli je naglašena sa oznakom (X). Takođe, u Tabeli 11. je navedeno koja se pogonska goriva smeju i pod kojim uslovima koristiti za transport određenih opasnih materija.

Tabela 11. Zahtevi koji se odnose na prevenciju rizika od požara u zavisnosti od namene vozila

Primena zahteva na pogonski sistem vozila	Oznaka vozila prema nameni				Opis
	EX III	EX II	FL	AT	
Rezervoari za gorivo, boce ili posude pod pritiskom	X	X	X	X[1]	Zahtevi se primenjuju na rezervoare za gorivo (posude pod pritiskom, kriogene posude i dr.) namenjene za napajanje pogonskih agregata vozila (motora sa unutrašnjim sagorevanjem, hibridnog pogona ili gorivnih ćelija). Konstrukcija i položaj rezervoara na vozilima mora obezbeđivati zaštitu od mehaničkih oštećenja, dovoljnu udaljenost ili propisnu izolaciju od izduvnog sistema i izvora napajanja – baterija. U slučaju curenja, konstrukcija i položaj rezervoara mora biti tako izvedena da gorivo, bez dodirivanja delova i opreme, slobodno curi na tlo. Dodatni zahtevi koji se odnose na izvođenje konstrukcije i položaja rezervoara za gasovita goriva i goriva koja se na izrazito niskim temperaturama prevode u tečno stanje, moraju biti takva da se isključuje mogućnost kontakta robe koja se transportuje sa gorivom ili duboko rashlađenim gasom. U zavisnosti od vrste pogonskog goriva, rezervoari moraju ispunjavati i dodatne specifične zahteve Pravilnika koji se odnose na određenu vrstu goriva. Rezervoari za tečna goriva, dizel i benzin, moraju ispunjavati zahteve Pravilnika (ECE R34)[2], a u slučaju tečnog naftnog gasa zahteve Pravilnika (ECE R67)[3]. Rezervoari za prirodni gas, kriogene posude i posude pod pritiskom, moraju ispunjavati zahteve Pravilnika (ECE R110)[4]. S druge strane u slučaju vodonika, posude pod pritiskom i kriogene posude, moraju ispunjavati zahteve Pravilnika (ECE R134; GT R13)[5,6].
Pogon vozila (motor sa unutrašnjim sagorevanjem)	X	X	X	X[1]	Konstrukcija i položaj ugradnje motora mora biti tako izvedena da se rizik od pojave požara svede na najmanju moguću meru. U zavisnosti od oznake vozila prema nameni, primena određenih vrste pogonskog goriva je dozvoljena samo ako su ispunjeni zahtevi dela 9 Sporazuma (ECE/326 i 352)[1], tj. odredbe koje se odnose na elektroopremu i specifične zahteve Pravilnika koji se odnose na određenu vrstu goriva (ECE R34; ECE R67; ECE R110; ECE R115; ECE R134; GT R13; GT R20)[2,3,4,5,6,7,8,9]. Dodatni zahtevi odnose se na postojanje sistema za automatsko gašenje požara i termoizolacije. Ograničenja po pitanju primene određene vrste goriva i načina obrazovanja smeše, odnose se za vozila oznake EX. Vozila oznake EX ne smeju koristiti gasovita goriva i motore kod kojih se upaljenje smeše vrši stranom energijom–svećicom, tj. dozvoljeni su samo motori kod kojih se upaljenje goriva vrši energijom sabijenog vazduha–dizel motori i goriva sa temperaturom paljenja iznad 55 °C.
Izduvni sistem	X	X	X	/	Konstrukcija i položaj izduvnog sistema na vozilima, u slučaju curenja robe ili goriva, mora obezbeđivati dovoljnu udaljenost ili propisnu izolaciju od izduvnog sistema ili njegovih delova (ECE/326 i 352)[1].
Elektropogon vozila	/	/	X	X	U zavisnosti od koncepcije pogona (hibridna koncepcija pogona, koncepcija pogona sa gorivnim ćelijama ili sa baterijama) vozila moraju biti u skladu sa navedenim zahtevima dela 9 Sporazuma (ECE/326 i 352)[1], odredbama koje se odnose na elektroopremu i sa dopunama Pravilnika (ECE R134; GT R13; ECE R110; GT R20)[6,7,8,9]. Pomenutim zahtevima obuhvaćeni su i sistemi za rekuperaciju pri kočenju, sistemi za punjenje baterija, mere za prevenciju od pregrevanja i posebne odredbe koje se odnose na vozila sa pogonom na gorivne ćelije. Konstrukcija i položaj ugradnje elektropogona u vozilu mora biti tako izvedena da se rizik od pojave požara svede na najmanju moguću meru. Koncepcije pogona (hibridna, sa gorivnim ćelijama ili sa baterijama) se ne smeju koristiti za vozila oznake EX, kao ni sistem za rekuperaciju pri kočenju na priključnim vozilima. Koncepcije pogona sa baterijama ne smeju koristiti za vozila oznake FL.

Oznake:
X – Primenjuje se, uz obavezno usaglašenost sa zahtevima iz dela 9 sporazuma.
/ – Ne primenjuje se.
[1] – Zahtevi se sprovode za vozila registrovana od 31.12.2026. godine.

Pogonsko gorivo	EXIII	EXII	FL	AT	Opis
Dizel	X	X	X	X	Najzastupljenije pogonsko gorivo u drumskom transportu opasne robe. Primenjuje se za sve oznake vozila prema nameni u skladu sa zahtevima navedenim u delu 9 Sporazuma (ECE/326 i 352)[1], pratećim odredbama koje se odnose na elektroopremu i Pravilnikom (ECE R34)[2].
Benzin	/	/	X	X	Primenjuje se uz ispunjenje strogih tehnički zahteva navedenih u delu 9 Sporazuma (ECE/326 i 352)[1], koji se odnose na konstrukciju rezervoara, odredbama koje se odnose na elektroopremu i Pravilnika (ECE R34)[2]. Tehničkim zahtevima definisana je obavezna primena uređaja za sprečavanje širenja plamena *(engl. Flame trap)* na rezervoarima ili zatvarača sa kojima se omogućava hermetičko zatvaranje rezervoara, čime se eliminiše isparavanje goriva i stvaranje zapaljivih para. U slučaju vozila oznake EX, smeju se koristiti samo motori kod kojih se upaljenje goriva vrši energijom sabijenog vazduha–dizel motori.
Prirodni gas	/	/	X	X	U skladu sa trendom smanjenja emisije gasova koji utiču na efekat staklene bašte, potreba za identifikacijom i istraživanjem novih pogonskih goriva sve je izraženija, uključujući prirodni gas, tečni naftni gas i vodonik. Prirodni gas se primenjuje uz stroge tehničke uslove u skladu sa zahtevima navedenim u delu 9 Sporazuma (ECE/326 i 352)[1], odredbama koje se odnose na elektroopremu i Pravilnika (ECE R110, ECE R115)[4,5] sa kojim su definisane odredbe za odobrenje komponenti, sistema i vozila sa pogonom na komprimovani i tečni prirodni gas. U slučaju vozila oznake EX, gasovita goriva se ne smeju koristiti.
Tečni naftni gas	/	/	X	X	Tečni naftni gas primenjuje se uz strogo definisane tehničke uslove, u skladu sa navedenim zahtevima dela 9 sporazuma (ECE/326 i 352)[1], odredbama koje se odnose na elektro opremu i odredbama Pravilnika (ECE R67, ECE R115)[3,5] sa kojim su definisani uslovi za odobrenje komponenti, sistema i vozila sa pogonom na tečni naftni gas. Tečni naftni gas se ne primenjuje za vozila oznake EX.
Vodonik	/	/	X	X	Kako je prethodno navedeno, proizvođači vozila sprovode sveobuhvatna istraživanja sa novim pogonskim energentima, uključujući pogon na vodonik, primenu gorivnih ćelija i elektropogon, tj. električna vozila. Značaj ove oblasti prepoznat i potvrđen je i u drumskom transportu opasne robe nizom međunarodnih propisa (ECE/326 i 352; ECE R134; GT R13; GT R20; ECE R100) [1,6,7,8,9]. Iako su navedeni pogonski energenti prepoznati, pre svega vodonik i gorivne ćelije, njihova primena je još uvek u fazama ispitivanja i usaglašavanja sa strogim zahtevima sporazuma. Shodno navedenom, primena vodonika kao pogonskog energenta u drumskom transportu opasne robe je prepoznata uz stroge tehničke uslove navedene u delu 9 sporazuma (ECE/326 i 352)[1], odredbama koje se odnose na elektroopremu i Pravilnicima (ECE R134; GT R13)[6,7]. Gorivne ćelije se ne primenjuju za vozila oznake EX.

Izvori:
[1] Međunarodni sporazum o drumskom transportu opasne robe, izdanje 2023 i 2025 (ECE/326 i 352);
[2] Pravilnik br. 34 (ECE R34) – Jednoobrazne odredbe za odobrenje vozila u pogledu sprečavanja rizika od požara;
[3] Pravilnik br. 67 (ECE R67) – Jednoobrazne odredbe za odobrenje komponenti, sistema i vozila sa pogonom na tečni naftni gas;
[4] Pravilnik br. 110 (ECE R110) – Jednoobrazne odredbe za odobrenje komponenti, sistema i vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas i/ili tečni prirodni gas;
[5] Pravilnik br. 115 (ECE R115) – Jednoobrazne odredbe za odobrenje komponenti i sistema u vozilima sa pogonom na tečni naftni gas i komprimovani prirodni gas;
[6] Pravilnik br. 134 (ECE R134) – Jednoobrazne odredbe za odobrenje komponenti, sistema i vozila sa pogonom na vodonik;
[7] Međunarodni Tehnički Pravilnik br. 13 (GT R13) – Jednoobrazne odredbe za vozila sa pogonom na vodonik i gorivne ćelije;
[8] Pravilnik br. 100 (ECE R100) – Jednoobrazne odredbe za odobrenje komponenti, sistema i vozila na elektropogon;
[9] Međunarodni Tehnički Pravilnik br. 20 (GT R20) – Jednoobrazne odredbe u pogledu bezbedonosnih karakteristika vozila na elektropogon.

Primena određenih pogonskih energenta u drumskom transportu robe, pre svega, u zavisnosti je od zahteva tržišta, tehničkih karakteristika vozila, regulatornih propisa i dr. U slučaju drumskog transporta opasne robe, pored pomenutih zahteva i regulativa, u pogledu kostrukcije vozila dodatno se primenjuju specifične odredbe definisane u Sporazumu (ECE 326 i 352). Kako je prethodno navedeno, pored aspekta bezbednosti, koji se ne dovodi u pitanje, zahtevi koji se postavljaju pred proizvođače ali i na korisnike vozila, mogu se načelno podeliti na ekološke i ekonomske. Prvu grupu čine regulatorni zahtevi usmereni na ostvarivanje ekološki

prihvatljivog transporta robe, dok drugu grupu čine zahtevi koji potiču od tržišta, koji se odnose na ekonomski održiv transport robe. Neminovno, navedeni zahtevi se u određenim segmentima poklapaju ali su prisutna i značajna mimoilaženja. Poklapanja se ogledaju u merama koje istovremeno mogu doprineti očuvanju životne sredine i smanjenju troškova, poput efikasnije upotrebe voznih resursa, boljih masenih iskorišćenja vozila, smanjenja broja praznih voznji i dr. Navedene mere doprinose smanjenju potrošnje goriva, koja se reflektuje i na ekološki i ekonomski aspekt. To se ogleda kroz nižu emisiju izduvnih gasova, pre svega ugljen–dioksida koji utiče na efekat staklene bašte, niže troškove goriva i registracije, kao i poreskim olakšicama za primenu goriva koja doprinose smanjenu efekta staklene bašte. S druge strane, regulatorni propisi sa kojima se postepeno zaoštravaju dozvoljene granične vrednosti emisije izduvnih gasova, nameću primenu novih tehnologija, poput primene alternativnih pogonskih energenata, sistema za naknadni tretman izduvnih gasova i dr.

Primena novih tehnologija za posledicu ima rast troškova proizvodnje vozila i visoka početna ulaganja prilikom nabavke vozila, ali doprinose očuvanju životne sredine, kroz smanjenje zagađenja. Pored navedenog, od proizvođača vozila ali i korisnika vozila, očekuje se i ostvarivanje konkurentnosti na tržištu, kroz smanjenje troškova proizvodnje i nabavke vozila, troškova transporta, ali i unapređenja u pogledu transportnih kapaciteta, povećanja prosečne brzine vozila i dr. Sa stanovištva drumskog transporta opasne robe, bezbedan, ekološki i ekonomski održiv transport podrazumeva primenu proverenih tehnologija, u skladu sa navedenim odredbama Sporazuma (ECE 326 i 352). Prilikom izbora vrste pogonskih goriva za transport određenih opasnih materija, ključno je uzeti u obzir i moguće posledice koje mogu nastati tokom transporta ili manipulacije (u postupcima snabdevanja gorivom, radnjama utovara ili istovara robe, i dr.). Kako je naglašeno u Tabeli 11, izbor i primena određenih pogonskih energenata vozila u zavisnosti je od opasne materije koja se transportuje, tj. delatnosti transportnog preduzeća, ali i od podržane infrastrukture u vidu dostupnosti energenata i mreže stanica za snabdevanje gorivom, autonomije vozila, cena energenta, ekoloških taksi i dr.

U skladu sa navedenim, u Tabeli 12. za različita tržišta izvršena je analiza dostupnosti pogonskih energenata (goriva) sa posebnim osvrtom na potencijalnu primenu kod teretnih vozila u drumskom transportu opasne robe na tržištu Republike Srbije. Analiza je izvršena sa stanovišta dostupnosti–broja stanica za snabdevanje i prosečnih tržišnih cena. Takođe, na osnovu rezultata prethodnih istraživanja, izvršeno je poređenje eksploatacionih karakteristika skupova vozila sa različitim vrstama pogonskih energenata. Poređenje je izvršeno sa aspekta prosečnih vrednosti zapremine rezervoara/posuda ili kapaciteta baterije, vremena potrebnog za punjenje (zadržavanje na stanici za snabdevanje), kao i prosečne autonomije.

Tabela 12. Analiza dostupnosti pogonskih energenata na različitim tržištima

Tržište/naziv pogonskog energenta (goriva)	Dizel	TNG	KPG/TPG	Vodonik	Elektropogon
Republika Srbija					
Broj stanica za snabdevanje[1,2]	1489	961	42/2	N.P	~150[1,2]
Prosečne cene [3,4]	1,65 [€/l]	0,81 [€/kg]	1,02 [€/kg]	N.P	0,12 [€/kWh] [4,b]
Evropska unija					
Broj stanica za snabdevanje[5,6]	>120000	>28000	3913/688	318	>65000[a]
Prosečne cene [5,6]	1,59 [€/l]	0,93 [€/l]	1,80 [€/kg]	~3,43 [€/kg] [c]	~0,21 [€/kWh][b]
Sjedinjene Američke Države					
Broj stanica za snabdevanje[7,8]	>140000	2997	1351/109	97	>44000[a]
Prosečne cene [7,8]	0,72 [€/l]	1,03 [€/l]	0,83 [€/kg]	~6,08 [€/kg][c]	~0,16 [€/kWh][b]
Kina					

Broj stanica za snabdevanje[9,10,11]	>100000	>9000	>9000	384	>100000[a]
Prosečne cene [9,10.11]	0,82 [€/l]	0,58 [€/l]	0,52 [€/kg]	~3,28 [€/kg][c]	~0,08 [€/kWh][b]

[a] U slučaju elektropogona, podaci se odnose na DC punjače snage (>150 kW);
[b] U zavisnosti od operatora i brzine punjenja, prikazane su prosečene cene električne energije za 2025. godinu;
[c] U zavisnosti od načina dobjanja vodonika, prikazane su prosečene cene vodonika dobijenog iz procesa obrade prirodnog gasa za 2025. godinu;
TNG – tečni naftni gas; KPG – komprimovani prirodni gas; TPG – tečni prirodni gas; N.P – nisu dostupni podaci;

Skup vozila (sastav tegljača i poluprikolice)

Naziv pogonskog energenta	Dizel	TNG	KPG/TPG	Vodonik	Elektropogon
Prosečna zapremina rezervoara/kapacitet baterije[12,13,d]	400 [dm^3]	400 [dm^3]	400 [dm^3]	400 [dm^3]	280 [kWh]
Prosečno vreme potrebno za punjenje[12,13,14]	~15 [min]	~20 [min]	~20 [min]	~15 [min]	1 – 4 [h]
Prosečna autonomija sastava vozila[12,13,14,15,16]	~1100 [km]	~600 [km]	~300/500 [km]	~480 [km]	~230/370 [km]

Izvor:

[1] Ministarstvo unutrašnje i spoljne trgovine, javna baza benzinskih stanica u Srbji, 2025: https://must.gov.rs/tekst/384/javna-baza-benziskih-stanica-u-srbiji.php;
[2] Javno preduzeće putevi Srbije, elektropunjači, 2025: https://www.putevi-srbije.rs/index.php/en/electric-chargers;
[3] NIS Petrol i Gazprom benzinske stanice, 2025: https://www.nisgazprom.rs;
[4] Elektroprivreda Srbije, 2025: https://www.eps.rs/lat/snabdevanje/Stranice/cene.aspx;
[5] ACEA, Heavy-duty vehicles, Charging and refuelling infrastructure requirements, 2021: https://www.acea.auto/publication/position-paper-heavy-duty-vehicles-charging-and-refuelling-infrastructure-requirements/;
[6] European Commission, Alternative Fuels Observatory, 2025: https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27/infrastructure;
[7] U.S Department of Energy, Alternative Fueling Station Locator, 2025: https://afdc.energy.gov/stations#/find/nearest;
[8] U.S Department of Energy, Average Retail Fuel Prices in the United States, 2025: https://afdc.energy.gov/data/10326;
[9] ICCT, Zero-Emission Medium-And Heavy-Duty Vehicle Market In China, 2024: https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/11/ID-247-%E2%80%93-China-ZEMHDVs_spotlight_final-1.pdf;
[10] IEEFA, Heavy trucking unlikely to materially increase China's LNG imports, 2024: https://ieefa.org/resources/heavy-trucking-unlikely-materially-increase-chinas-lng-imports;
[11] China Fuel Cards Market Size, Share, Key Players, Competitor Card Analysis and Forecast to 2028, 2024: https://www.globaldata.com/store/report/china-fuel-cards-market-analysis;
[12] Real-world performance of battery electric heavy-duty vehicles in China, 2023: https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/04/HDV-BEVs-real-world_final2.pdf;
[13] Public charging requirements for battery electric long-haul trucks in Europe: a trip chain approach, 2023: https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/bd314b3f-f21a-4e73-bd32-48ff6a8d022a/content;
[14] Alternative fuel infrastructures for heavy-duty vehicles, 2021: https://bit.ly/3o58pmI;
[15] Test report of Iveco LNG-powered HD-truck, 2017: https://www.iveco.com/poland/-/media/Iveco---Press-Import/poland/Pdfs/20171110_Raport-LNG_Unilever_Link_Iveco_Cryogas.pdf?rev=-1;
[16] NSC, Fuel consumption limits for heavy-duty commercial vehicles, 2019: https://theicct.org/sites/default/files/China%20Stage%203%20Standards%20%28GB30510-2018%29.pdf;
[17] CTL, Outlook Hinterland and Continental Freight, 2020: https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/CE_Delft_190112_Outlook-Hinterland-Continental-Freight-2020.pdf.

[d] Za potrebe analize usvojene su prosečne vrednosti zapremine rezervoara za gorivo (uključujući kriogene posude i posude pod pritiskom – boce) i kapaciteta baterija; Podaci za vodonik odnose se na vozila opremljena sa tehnologijom gorivnih ćelija.

Analiza razvijenosti infrastrukture, odnosno dostupnosti pogonskih energenta u vidu broja stanica za snabdevanje, ukazuje da pored najzastupljenijeg dizel goriva za pogon teških teretnih vozila u Evropskoj uniji, Sjedinjenim Američkim državama i Kini, značajnu zastupljenost po broju stanica imaju alternativna goriva, pre svega tečni naftni gas i prirodni gas, kao i vozila na elektropogon. Zastupljenost, odnosno razlozi zbog kojih određena tržišta vrše diverzifikacuju pogonskih energenata, mogu se objasniti ekonomskim, tehnološkim, ekološkim i svakako geopolitičkim faktorima. Sa ekonomskog aspekta, značajniji razlozi prelaska na nove vrste energenata, su: smanjenje troškova i zavisnosti od uvoza naftnih derivata (prvenstveno se odnosi na elektrovozila), niži troškovi naplate emisije izduvnih gasova koji doprinose efektu staklene bašte, težnja ka obezbeđivanju stabilnih cena za duži vremenski period i dr. Tehnološki aspekt usko je povezan sa razvojem privrede države, odnosno potrebnom infrastrukturom sa kojom se omogućava kontinuirani transport i snabdevanje određene vrste energenata. Takođe, tehnološki aspekt obuhvata i napredak u oblasti razvoja vozila, kroz primene novih tehnologija pogona na gorivne ćelije i baterije prvenstveno sa stanovišta bezbednosti, ali i povećanju radijusa kretanja vozila i dr. Sa stanovišta regulatornog i ekološkog aspekta, kroz brojne međunarodne propise definisani su zahtevi koje vozila moraju ispunjavati u cilju smanjenja zagađenja, kao i regulatorni okviri za primenu poreskih olakšica sa kojim se dodatno utiče na tranziciju tržišta ka određenim energenatima. Svakako i

geopolitički aspekt u velikoj meri definiše opredeljenost i usmeravanje tržišta ka određenim energentima, pre svega u cilju energetske održivosti.

U Evropskoj uniji i Sjedinjenim Američkim Državama poseban akcenat se stavlja na stanice za snabdevanja elektrovozila (elektropunjače) ali i za vozila koja koriste gasovita goriva, odnosno tečni naftni gas i nešto manjem udelu prirodni gas. U slučaju Kine, najbrže rastuće ekonomije sveta, kao i na tržištu Evropske unije i Sjedinjenih Američkih Država akcenat se stavlja na elektrovozila i na gasovita goriva. Bez sumnje i po pitanju vodonika kao pogonskog energenta, iako tehnologija kao i kod elektropogona nije omasovljena za teretna vozila, prisutni su određeni koraci u domenu dostupnosti infrastrukture na pomenutim tržištima. U domenu troškova, podaci iz Tabele 12 ukazuju na varijabilnost u cenama između različitih tržišta, u kom se posebno ističe kinesko, gde su cene gasovitih goriva i električne energije značajno konkurentnije od ostalih tržišta. Bitno je napomenuti da se cene električne energije navedene u Tabeli 12, odnose na prosečne cene električne energije za 2025/2026. godinu, na razmatranim tržištima i da je konačna cena punjenja baterija elektrovozila u zavisnosti od operatora i brzine punjenja. Takođe, način dobijanja vodonika u velikoj meri utiče na tržišne cene. U slučaju dobijanja vodonika iz obnovljivih izvora, tzv. zelenog vodonika, troškovi su značajno viši od troškova vodonika koji se dobija preradom prirodnog gasa, tzv. plavog vodonika, navedeno u prethodnom odeljku. Osim toga, u Tabeli 12 pored dostupnosti određenih pogonskih energenata u vidu broja stanica za snabdevanja, prvenstveno navedenih u kontekstu pravca razvoja i potencijalnog prelaska sa konvencionalnih na alternativne pogonske energente, prikazan je i deo eksploatacionih karakteristika skupova vozila u zavisnosti od vrste pogonskog energenta.

Poređenje eksploatacionih karakteristika vozila zahteva sveobuhvatni pristup u kojem se vozila analiziraju iz više aspekata, pre svega sa stanovišta tehničkih karakteristika, gde se u zavisnosti od namene vozila vrši selekcija vozila po tipu pogonskog agregata, vrsti energenta, zapremini rezervoara/posuda, kapacitetu baterija, ekološkim parametrima, masenim parametrima, specifičnim tehničkim karakteristikama nadgradnji i dr. Takođe, pri izboru vozila potrebno je razmotriti i eksploatacione zahteve, poput razvijenosti i dostupnosti infrastrukture, autonomije vozila sa jednim punjenjem i vremena zadržavanja na stanicama za snabdevanje, troškova nabavke vozila, cena energenata, mogućih poreskih olakšica i dr. Polazeći od prethodno navedenog i na osnovu rezultata prethodnih istraživanja datih u Tabeli 12, za potrebe analize i u kontekstu pravca razvoja i primene novih pogonskih energenata, prikazani su kompilirani podaci o prosečnim vrednostima vremena utrošenog na punjenje i pređenog puta sa jednim punjenjem. Bitno je napomenuti da se navedene vrednosti odnose na usvojene vrednosti rezervoara/posuda za gorivo zapremine od 400 dm^3, odnosno kapaciteta baterija od 280 kWh. Pored toga, važno je i istaći da rezultati odgovaraju opterećenju vozila u proseku oko 70% od maksimalnih dozvoljenih kapacita, da vrednosti prosečnog vremena punjenja obuhvataju i pripremne radnje na stanicama za snabdevanje energentima i da su obuhvaćene deonice u naseljenim mestima i na otvorenom putu. Analiza, prosečnog vremena utrošenog na punjenje i prosečnog pređenog puta sa jednim punjenjem u zavisnosti od vrste pogonskog energenta, ukazuje da vozila sa pogonom na konvencionalna dizel goriva imaju najbolje rezultate, po pitanju navedenih kriterijuma. Svakako, zapažene rezultate imaju vozila sa pogonom na gasovita goriva i vodonik, pogotovo kada se uključe povoljnosti koje potiču od ekonomskih i ekoloških aspekata, troškovi goriva i emisija izduvnih gasova. U slučaju vozila na elektropogon, iako su na tržištima prisutna teretna vozila sa fabrički deklarisanom autonomijom preko 500 km (Wilson, 2023; Hyundai, 2025), u realnim uslovima vožnje i temperaturnim opterećenjima, te vrednosti su manje. Drugi ograničavajući faktor je vreme punjenja baterija.

3.2.2 Izduvna emisija

Razvoj i ispitivanje motora, ali i vozila u celini, usko je povezan sa regulativama o očuvanju životne sredine, odnosno emisionim propisima kojima su definisane dozvoljene granične vrednosti štetnih komponenti u izduvnim gasovima motornih vozila. Prvi emisioni propisi, kojima su propisane prve dozvoljene vrednosti ugljen–monoksida (CO) i ugljovodonika (HC), počeli su da se primenjuju na vozila od 1968. godine, na celoj teritoriji Sjedinjenih Američkih Država, uz osnivanje Odbora za vazdušne resurse Kalifornije CARB *(engl. California Air Resources Board)*. U Evropi prvi zakonski obavezujući emisioni propisi za motorna vozila počeli su da se primenjuju od 1970. godine, dok je savremeno normiranje započeto 1993. godine, uvođenjem Euro standarda (norme). S druge strane, u Kini obavezujući nacionalni emisioni propisi za motorna vozila počeli su sa primenom od 2000. godine, pri čemu su prvi propisi bili zasnovani na evropskim propisima (SAC, 2019; Phinia, 2024; EPA, 2025; CARB, 2025). U Sjedinjenim Američkim Državama, emisione propise za teška teretna vozila donosi Agencija za zaštitu životne sredine EPA *(engl. Environmental Protection Agency)* i Odbor za vazdušne resurse Kalifornije CARB. U Evropi, u okviru zakonodavstva Evropske unije, emisione propise za sve kategorije vozila donosi Evropska komisija EC *(engl. European Commission)*, podržana Komisijom Ujedinjenih Nacija za Evropu UNECE *(engl. United Nations Economic Commission For Europe)* i Evropskom agencijom za zaštitu životne sredine EEA *(engl. European Environment Agency)*. U slučaju Kine, zakonski obavezujući emisioni propisi donose se na nivou nadležnih ministarstava za ekologiju i zaštitu životne sredine. Kineski emisioni propisi, poznati kao kineski nacionalni standardi CNS *(engl. China National Standards)*, su ekvivalentni ili u određenim segmentima restriktivniji od evropskih emisionih propisa (SAC, 2019; Phinia, 2024; EEA, 2024; EPA, 2025; CARB, 2025). U Evropi, sa aspekta teretnih vozila, emisioni propisi počinju da se primenjuju od 1987. godine, uvođenjem Direktive (88/77/EEC), koja je prva jasno definisala metode ispitivanja emisije izduvnih gasova kod dizel motora koji se ugrađuju u vozila. Kao rezultat primene Direktive, narednih decenija usledio je niz novih obavezujućih normi i metoda ispitivanja. Hronološki pregled, uvođenja obavezujućih Euro normi i metoda ispitivanja za teretna vozila, dat je u Tabeli 13.

Tabela 13. Hronološki pregled uvođenja Euro normi za teretna vozila

Godina primene	1992/1993	1995/1996	2000	2005/2006	2008/2009	2013
Norma	Euro I	Euro II	Euro III	Euro IV	Euro V	Euro VI
Test ciklus	ECE R49		ESC/ETC			WHSC/WHTC, WHVC, OEC/ISC
Direktiva	91/542/EEC		1999/96/EC			595/2009/EC

Izvor:
[1] Warner (2021). Worldwide Emission Standards, On and Off-Highway Commercial Vehicles;
[2] Phinia (2024). Worldwide Heavy-Duty And Off-Road Emission Standards, On-Road Heavy-Duty Vehicles And Engines, Off-Road/Non-Road Vehicles, Engines And Equipment.

U slučaju Euro I norme, u postupcima ispitivanja i sertifikacije dizel motora teretnih vozila, primenjivao se stacionarni test ciklus ECE R49 zasnovan na Direktivi (91/542/EEC) i Pravilniku (ECE R49) sa kojima su definisane odredbe u vezi mera koje je potrebno sprovesti radi smanjenja izduvne emisije. Stacionarni test ciklus ECE R49 primenjivao se do Euro II norme. Temelje za nadovezujuće norme, Evropski parlament je 1999. godine postavio usvajanjem nove Direktive (1999/96/EC), kojom su definisane odredbe u vezi mera koje je potrebno sprovesti radi smanjenja izduvne emisije kod dizel i oto motora. Takođe, dopunama ove Direktive definisane su granične vrednosti emisije izduvnih gasova kod ekološki prihvatljivih vozila EEV *(engl. Enhanced Environmentally Friendly Vehicles*) sa pogonom na gasovita goriva.

Uvođenjem Euro III norme od 2000. godine, za postupke ispitivanja i sertifikacije emisije izduvnih gasova kod dizel i oto motora, kao zamena za ECE R49, počinju da se primenjuju novi test ciklusi u stacionarnim ESC *(engl: European Stationary Cycle)* i nestacionarnim uslovima ETC *(engl: European Transient Cycle)*. Postupci sprovođenja ispitivanja u zavisnosti su od načina obrazovanja smeše, tj. u slučaju dizel motora ispitivanja se moraju izvoditi sa oba ciklusa, dok kod oto motora ispitivanje je moguće sprovesti samo sa ETC ciklusom. Novi test ciklusi, primenjivali su se do Euro V norme, uz postepena zaoštravanja graničnih vrednosti izduvne emisije. Odredbe u vezi mera za smanjenje izduvne emisije kod dizel i oto motora, koje se odnose na sisteme za naknadni tretman izduvnih gasova, sistem dijagnostike na vozilima OBD *(Engl. On-Board Diagnostics)*, kao i odredbe za ekološki prihvatljiva vozila, usvojene su Direktivom (2005/55/EC).

Od 2013. godine, stupanjem na snagu nove Direktive (595/2009/EC) uvedena je Euro VI norma. Novom Direktivom definisane su odredbe koje se odnose na ograničenje izduvne emisije kod dizel i oto motora, kao i izmene koje se odnose na sisteme dijagnostike na vozilima OBD, kao i nove metode ispitivanja. Saglasno navedenim odredbama Direktive, postupci sertifikacije emisije izduvnih gasova kod motora teretnih vozila, podeljeni su na dva dela. Prvi deo, odnosi se na postupke sertifikacije motora i vozila sa kojima su obuhvaćena ispitivanja u stacionarnim i nestacionarnim uslovima rada, primenom novih test ciklusa WHSC *(engl: World Harmonized Stationary Cycle)* i WHTC *(engl: World Harmonized Transient Cycle)*. Takođe, ispitivanjima su obuhvaćeni testovi koji simuliraju realne vozne uslove, tj. nestandardni test ciklusi OCE *(engl. Off-cycle Emission testing)*. Drugi deo, obuhvata ispitivanja usaglašenosti u eksploataciji ISC *(engl. In–service conformity)*, prvenstveno sa svrhom potvrde ispunjenja propisanih vrednosti emisije izduvnih gasova vozila u eksploataciji. Predmetna ispitivanja sprovode se na kompletnim vozilima primenom prenosnih uređaja PEMS *(engl. Portable Emission Measurement System)*. Uslovi za početak ispitivanja odnose se na minimalnu pređenu udaljenost, tj. vozila pre početka ispitivanja moraju imati najmanje 25000 km na odometar satu (Perujo, 2021). Polazeći od navedenih regulatornih propisa, narednih godina usledio je niz postepenih zaoštravanja dozvoljenih graničnih vrednosti štetnih komponenti u izduvnim gasovima koje su se uvodile po fazama, alfanumeričkim redosledom od Euro VI–A do Euro VI–E. Imajući u vidu visoke standarde Evropske unije, prvenstveno po pitanju smanjenja zagađenja saobraćajnog sektora, 2024. godine usvojena je Uredba (2024/1257/EU) kojom su postavljeni temelji za uvođenje Euro VII norme za sve kategorije vozila. Uredba propisuje pravila za ispitivanja i sertifikaciju motornih vozila, motora i pratećih sistema kojima bi se zamenile postojeće odredbe koje se odnose na Euro VI normu. Uredba propisuje i dodatne zahteve koji se odnose na ispitivanja u realnim uslovima vožnje, u pogledu redukcije emisije izduvnih gasova i potrošnje goriva, oštrije granične vrednosti (ugljen–monoksida (CO), azotnih oksida (NO_x), čestičnog zagađenja (PM), nesagorelih ugljovodonika (HC)), metana (CH_4), amonijaka (NH_3) i azot–dioksida (N_2O), kao i na kočni sistem, pneumatike, trajnosti baterija kod elektrovozila i dr. Postupci ispitivanja i sertifikacije su, kao kod Euro VI norme, podeljeni na dva dela, uz određena proširenja (2024/1257/EU; Dornoff and Rodríguez, 2024).

Polazeći od prethodno navedenog, za nestacionarne uslove ispitivanja, u Tabeli 14, navedene su granične vrednosti štetnih komponenti u izduvnim gasovima za dizel i oto motore kod teških teretnih vozila. Granične vrednosti su navedene u odnosu na Euro norme i primenjene test cikluse i izražene su u g/kWh.

Tabela 14. Granične vrednosti štetnih komponenti u izduvnim gasovima kod teretnih vozila u Evropi za nestacionarne uslove ispitivanja

Norma	Godina primene	Test ciklus	Emisija				
			CO	NMHC	CH_4[1]	NO_x	PM[2]
			[g/kWh]				
Euro III	2000	ETC	5,45	0,78	1,16	5,00	0,16
Euro IV	2005		4,00	0,55	1,10	3,50	0,03
Euro V	2008		4,00	0,55	1,10	2,00	0,03
Euro VI	2013	WHTC WHVC, OEC/ISC	4,00	0,16	0,50	0,46	0,01
Euro VII	2028/2029[3]		1,50	0,08	0,50	0,20	0,008

[1] Primenjuje se Euro III–VI samo za motore sa pogonom na KPG, TPG i TNG, planirana primena od Euro VII na sve motore (uključujući, KPG, TPG, biogoriva, vodonik i dr.);
[2] Ne primenjuje se na Euro III–VI motore sa pogonom na KPG, TPG i TNG;
NMHC – nemetanski ugljovodonik;
[3] Regulation 2024/1257/EU.

Izvor:
[1] Warner (2021). Worldwide Emission Standards, On and Off-Highway Commercial Vehicles;
[2] Phinia (2024). Worldwide Heavy-Duty And Off-Road Emission Standards, On-Road Heavy-Duty Vehicles And Engines, Off-Road/Non-Road Vehicles, Engines And Equipment.

Zajednički cilj emisionih propisa je ograničenje negativnog uticaja izduvne emisije koja potiče od drumskog saobraćaja na zdravlje ljudi, životnu sredinu, uključujući biodiverzitet i ekosisteme, klimatske promene i dr. Postepena zaoštravanja dozvoljenih graničnih vrednosti emisije izduvnih gasova, istovremeno su praćena sa uvođenjem novih tehničkih rešenja u svrhu redukcije izduvne emisije. Rešenja se načelno mogu grupisati na primenu određenih vrsta goriva i podizanju kvaliteta goriva, zatim primenu različitih konstrukcionih poboljšanja u samom motoru i primenu različitih tehnoloških i konstrukcionih rešenja za naknadni tretman izduvnih gasova i dr. U navedenom kontekstu utvrđivanje direktnih efekata primene različitih pogonskih goriva, konstrukcionih rešenja za naknadni tretman izduvnih gasova i regulatornih propisa, kao i procesa sagorevanja obuhvaćeno je drugim razvijenim modelom.

3.2.2.1 Uticaj procesa sagorevanja na sastav izduvne emisije

Proces sagorevanja u motoru tesno je povezan sa načinom obrazovanja smeše i u zavisnosti kako se odvija proces sagorevanja razlikujemo oto i dizel motore (Tomić i Petrović, 2000). Proces sagorevanja predstavlja složen fizičko–hemijski proces tokom kojeg dolazi do intenzivne oksidacije goriva uz oslobađanja velike količine toplote, praćene pojavom svetlosnih efekata u kojem razlikujemo reaktant, odnosno gorivo, i oksidator, najčešće kiseonik iz atmosferskog vazduha. U zavisnosti od količine dostupnog oksidatora, sagorevanje može biti potpuno ili nepotpuno.

U slučaju kada je prisutna dovoljna količina oksidatora (kiseonika iz atmosferskog vazduha) za potpunu oksidaciju goriva, tada imamo potpuno sagorevanje (Milivojević, 2023). Drugim rečima, kada količina vazduha koja učestvuje u sagorevanju tačno odgovara količini potrebnoj za potpuno (stehiometrijsko) sagorevanje goriva, koeficijent viška vazduha iznosi 1 ($\lambda=1$). Produkti potpunog sagorevanja kod ugljovodoničnih goriva su ugljen–dioksid (CO_2), vodena para (H_2O), azot (N_2), kiseonik (O_2) i toplotna energija. Koeficijent viška vazduha λ je bezdimenziona veličina koja prikazuje odnos između stvarne količine vazduha koja učestvuje u sagorevanju i minimalne količine vazduha potrebne za potpuno sagorevanje određene količine goriva (Tomić i Petrović, 2000; Popović i Miljić, 2018; Ivković, 2020). Kada je količina vazduha u sagorevanju manja, smeša se smatra bogatom ($\lambda<1$), a u slučaju veće količine vazduha, smeša se smatra siromašnom ($\lambda>1$). Klasifikacija smeše prema vrednostima

koeficijent viška vazduha λ je univerzalna, tj. nije u zavisnosti od vrste ili sastava goriva (Popović i Miljić, 2018). S druge strane, nedovoljne količine oksidatora dovode do nepotpunog sagorevanja, koje je praćeno produktima poput ugljen–monoksida (CO), azotnih oksida (NO_x), ugljovodonika (HC), čestica (PM) i manjih količina CO_2 i vodene pare. Nepotpuna oksidacija ugljenika predstavlja prateću pojavu prilikom sagorevanja svih ugljovodoničnih goriva u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem. Kao takva, najizraženija je u uslovima bogate smeše $\lambda<1$, gde nastaje usled nedovoljne količine kiseonika i dovodi do formiranja koncentracije CO, HC, PM i dr. Takođe, važno je i istaći da je nepotpuno sagorevanje prisutno i u uslovima veoma siromašne smeše $\lambda>1$, usled nestabilnosti procesa sagorevanja. (Tomić i Petrović, 2000; Popović i Miljić, 2018; Milivojević, 2023). Uopšteno govoreći, uslovi za potpuno sagorevanje gde motor radi sa precizno održavanom teorijskom stehiometrijskom smešom $\lambda=1$ su i danas, pored primene elektronskih upravljačkih jedinica, teško izvodljivi. Savremeni motori, radi postizanja efikasnijeg sagorevanja i kontrole izduvne emisije, opremljeni su sa elektronski upravljačkim jedinicama sa kojima se pomoću povratne sprege vrši regulacija ubrizgane količine goriva. Na osnovu povratnih podataka sa λ–senzora određuje se prisustvo kiseonika u izduvnim gasovima, preko kojih se vrši regulacija ubrizgane količine goriva u svrhu obrazovanja i održavanja smeše bliske oblastima $\lambda\approx1$ (Tomić i Petrović, 2000; Ivković. 2020). Načelno u oblastima siromašne smeše $\lambda>1$, svojstveno za dizel motore, emisije CO i HC su niske, dok je emisija NO_x značajno viša. U oblastima bogate smeše $\lambda<1$, emisije CO i HC značajno su više, dok je emisija NO_x niska, usled nedostatka kiseonika. Vrednosti emisije NO_x u zavisnosti su od sastava smeše, temperature sagorevanja i zadržavanja izduvnih gasova na visokim temperaturama (Tomić i Petrović, 2000). Kako se koncentracija kiseonika povećava (postepeno se osiromašuje smeša) raste i temperatura sagorevanja, a samim tim dolazi do porasta emisije NO_x. S druge strane, nakon dostizanja određenih maksimalnih vrednosti NO_x u oblastima stehiometrijske smeše i daljim osiromašenjem smeše dolazi do njenog smanjenja, usled smanjenja temperature. U oblastima blago siromašne sromašne smeše ($\lambda\approx1{,}05–1{,}1$) emisija NO_x je visoka, dok su emisije CO i HC niske. (Tomić i Petrović, 2000; Guo, Ge, Hao, Tan, Li, Feng, 2014; Anderson, 2015; Quiros, Smith, Thiruvengadam, Huai, Hu, 2017; Quiros, Thiruvengadam, Pradhan, Besch, Thiruvengadam, Demirgok, Hu, 2016).

Kako je proces sagorevanja tesno povezan sa načinom obrazovanja smeše, prisutne su i razlike u sastavu izduvne emisije kod oto i dizel motora. Razlike su najistaknutije tokom nepotpunog sagorevanja, kada se formiraju razne toksične komponente, među kojima su najzastupljeniji CO, HC, NO_x i PM. Takođe, na sastav izduvnih gasova utiče i vrsta goriva, tj. broj atoma ugljenika u molekulu, kako je navedeno u delu poglavlju pogonska goriva. Posmatrano iz ugla izduvne emisije koju emituju dizel motori u poređenju sa oto motorima sa pogonom na prirodni gas, dizel motori imaju više vrednosti čestičnih materija PM i relativno više vrednosti azotnih oksida NO_x, dok su koncentracije ugljen–monoksida CO i nesagorelih ugljovodonika HC znatno više kod oto motora. Prethodno navedeno od ključne je važnosti za rad katalitičkih konvertora, tj. sistema za naknadni tretman izduvnih gasova o kojima će biti više reči u narednom odeljku rada, a koji se nadovezuju na prethodne analizirane kontekste sa aspekta pogonskih goriva i izduvne emisije. U nastavku rada biće prikazani primarni procesi nastanka određenih zagađujućih materija kod dizel i oto motora, kao i načini za njihovu redukciju putem sistema za naknadni tretman izduvnih gasova.

Ugljenmonoksid (CO), otrovan gas, bez boje i mirisa. Nastaje usled nepotpunog sagorevanja ugljenika iz goriva, tj. nedovoljnje količine kiseonika u smeši, pri čemu su vrednosti najizraženije u radu pri punom opterećenju motora i tokom hladnog starta (Tomić i Petrović, 2000; Ivković, 2012).

Nesagoreli ugljovodonici (HC), obuhvataju grupu ugljovodoničnih jedinjenja C_xH_y neprijatnog mirisa, koja se razlikuju u odnosu na broj atoma ugljenika i vodonika. Vrednosti emisije HC u manjoj meri zavise od sastava smeše, više su rezultat nepotpunog procesa sagorevanja usled gašenja plamena, hladnog starta ili rada motora pri punom opterećenju. Kod oto motora sa pogonom na prirodni gas, emisija ukupnih ugljovodonika je pretežno u obliku metana CH_4 (gasa koji zauzima više od 90% u udelu prirodnog gasa i koji ima manju toksičnost u odnosu na druge nemetanske ugljovodonike) (Ivković, 2012; Manojlović, Momčilović, Milović, Trifunović, Kaplanović, Milosavljević, 2019).

Azotni oksidi (NO_x), predstavljaju toksična jedinjenja koja nastaju kao produkt oksidacije azota pri visokim temperaturama u procesima sagorevanja, pri čemu su vrednosti najizraženije pri punom opterećenju motora. Azotni oksidi NO_x obuhvataju grupu jedinjenja, gde je najzastupljeniji azot–monoksid NO sa udelom preko 90% svih azotovih oksida, zatim sledi azot–dioksid NO_2 sa udelom oko 5% i ostatak svih ostalih azotnih jedinjenja koja reaguju sa kiseonikom. (Ivković, 2012; Manojlović i ostali, 2019).

Čestične materije (PM), predstavljaju veoma štetne zagađujuće materije. Nastaju usled nedovoljne količine vazduha u smeši i pri visokim temperaturama koje se javljaju u procesima sagorevanja. Navedene okolnosti dovode do raspadanja molekula ugljovodoničnih goriva na vodonik i ugljenik. Vodonik zbog većih difuzionih sposobnosti vezuje za kiseonik i sagoreva, dok se nesagoreli ugljenik izdvaja u vidu čestica ugljenika–čađi. Novonastale čestice ugljenika nisu toksične, sve dok u procesu izduva ne ostvare vezu sa teškim nesagorelim ugljovodonicima i drugim jedinjenjima koja se stvaraju tokom sagorevanja. Na formiranje čestičnih materija značajan uticaj ima vrsta goriva, pre svega broj atoma ugljenika u molekulu. Čestične materije kod sagorevanja prirodnog gasa su zanemarljive u poređenju sa sagorevanjem dizela (Tomić i Petrović, 2000; Ivković, 2012).

Ugljen–dioksid (CO_2), predstavlja hemijsko jedinjenje koji zajedno sa metanom (CH_4) doprinosi stvaranju efekta staklene bašte. Nastaje usled sagorevanja ugljenika iz goriva, kao produkt potpunog sagorevanja, dok metan spada u ugljovodonike i može se javiti kao produkt nepotpunog sagorevanja, naročito kod vozila sa pogonom na prirodni gas. Vrednosti emisije CO_2 u direktnoj su zavisnosti od vrste motora i načina obrazovanja smeše, tj. od utrošene količine goriva (Tomić i Petrović, 2000; Milivojević, 2023). Metode za redukciju emisije CO_2 nisu zasnovane na primeni sistema za naknadni tretman izduvnih gasova, već se zasnivaju na raznim konstrukcionim rešenjima na pogonskim agregatima i vozilima, načinima vožnje i dr., sa ciljem smanjenja potrošnje goriva, kao i izborom pogonskog goriva sa nižim sadržajem ugljenika. Vrednosti emisije CO_2 kod sagorevanja prirodnog gasa zavise od procentualnog udela metana u prirodnom gasu (Ivković, 2012).

3.2.3 Sistemi za naknadni tretman izduvnih gasova

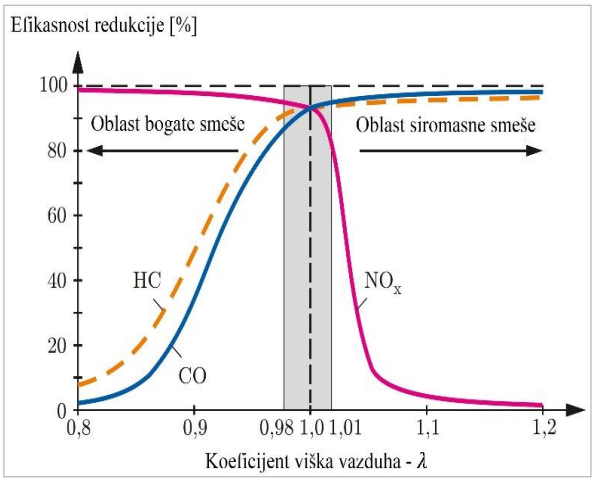
Prethodno je ukazano na kontinuirana zaoštravanja graničnih vrednosti emisije izduvnih gasova kroz postepena uvođenja regulatornih propisa. U osnovi, proces regulacije emisije izduvnih gasova moguće je izvesti na tri načina, pre motora (primenom određenih vrsta pogonskih goriva i podizanjem kvaliteta goriva), u motoru (primenom različitih konstrukcionih poboljšanja u samom motoru) i nakon motora (primenom različitih tehnoloških i konstrukcionih rešenja za naknadni tretman izduvnih gasova). Uopšteno posmatrano, tehnološka i konstrukciona rešenja temelje se na primeni raznih filtera, katalitičkih konvertora (katalizatora), recirkulaciji izduvnih gasova i dr. Najrasprostranjeniji sistemi zasnovani su na

katalizatorima, čiji se princip rada zasnovan na hemijskim procesima kojima se podvrgavaju izduvni gasovi u cilju smanjenja štetnih emisija, poput CO, NO_x, HC, PM i dr. Na tržistu prisutne su različite vrste katalizatora koji se ugrađuju u vozila i koji se načelno mogu podeliti prema vrsti motora (dizel ili oto motori) i prema vrsti materijala od kojeg je izrađeno aktivno jezgro katalizatora (keramički ili metalni) (Vaneman, 1991; Haaß and Fuess, 2005; Ianoşev, Lazău, Păcurariu and Avramescu, 2008; Feriyanto, Pranoto, Carles, and Leman, 2020). Prema vrsti motora, tj. načinu obrazovanja smeše, osnovnu grupu čine oksidacioni katalizatori, katalizatori zasnovani na selektivnoj redukciji i trostepeni katalitatori.

- Uloga oksidacionih katalizatora OC *(engl. Oxidation Catalyst)* svodi se na redukciju emisija CO i HC na CO_2 i vodenu paru. Svoju primenu nalaze i kod oto i dizel motora;
- Uloga redukcionih katalizatora svodi se na smanjenje emisije NO_x, putem SCR sistema *(engl. Selective Catalytic Reduction)*. Emisija NO_x redukuje se na azot (N_2), kiseonik (O_2), CO_2 i vodenu paru. Svoju primenu najčešće nalaze kod dizel motora;
- Uloga trostepenih katalizatora TWC *(engl. Three–Way Catalyst)* svodi se na istovremenu redukciju emisija CO, HC i NO_x na CO_2, N_2, O_2 i vodenu paru. Svoju primenu nalaze kod oto motora.

Prema vrsti materijala od kojeg je izrađeno aktivno jezgro katalizatora, unutar kućišta od nerđajućeg čelika, razlikujemo keramičke i metalne katalizatore. Metalni katalizatori imaju određene prednosti u odnosu na keramičke, poput termičke otpornosti, mehaničke izdržljivosti i manjeg otpora protoka izduvnih gasova. S druge strane keramički katalizatori su ekonomski isplatljiviji (Vaneman, 1991; Haaß and Fuess, 2005; Ianoşev et. al., 2008; Feriyanto et. al., 2020). U slučaju keramičkih katalizatora, aktivno jezgro predstavlja monolitnu strukturu u obliku saća, uglavnom izrađenu od kordijerita ($2MgO{\cdot}2Al_2O_3{\cdot}5SiO_2$), na koju se u tankim slojevima nanosi gama aluminijum oksid ($\gamma–Al_2O_3$) sa pratećim primesama, najčešće oksidima cerijuma, cirkonijuma, lantana, nikla, titanijuma, itrijuma, volframa i dr. Prednosti kordijerita su visoka hemijska otpornost, dobra termička otpornost i nizak koeficijent termičkog širenja. Aktivne komponente katalizatora predstavljaju platinske, paladijumske ili rodijumske soli, kao što su paladijum–hlorid ($PdCl_2$), rodijum–hlorid ($RhCl_3$) i dr. Nasuprot navedenom, kod metalnih katalizatora aktivno jezgro izrađeno je od metalnih legura, najčešće govože–hrom–aluminijuma (FeCrAl) (Vaneman, 1991; Feriyanto et. al., 2020).

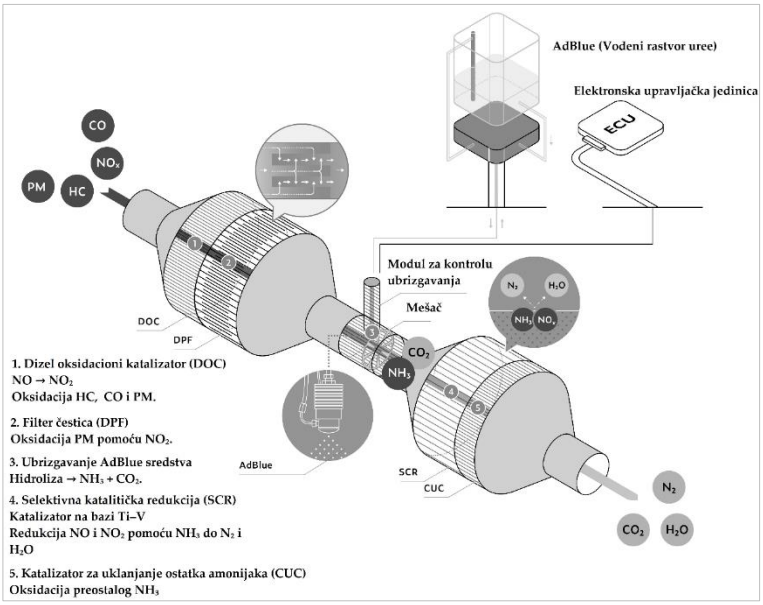
Polazeći od prethodno navedenog, na Slici 13. prikazana efikasnost redukcije emisije CO, HC i NO_x od radnog sastava smeše, putem trostepenog katalizatora. U cilju optimalne kontrole rada motora i redukcije izduvne emisije, proizvođači vozila kao sastavni deo katalitičkih konvertora uvode razne senzore (davače), poput λ–senzora (O_2–senzor) kojim se određuje prisustvo kiseonika u izduvnim gasovima. Parametri očitani sa senzora koriste se za podešavanje optimalnog radnog sastava smeše u svrhu što potpunijeg sagorevanja, nadzora nad radom motora i upravljanjem sistemima za kontrolu izduvne emisije (Feßler, 2010; Popović i Miljić, 2018; Eickenhorst and Koch, 2023). Parametri očitani sa senzora od posebnog su značaja za



Slika 13. Efikasnost redukcije izduvne emisije primenom trostepenog katalizatora *(Izvor: Feßler, 2010)*

rad katalizatora ali i motora u celini, jer trostepeni katalizatori najvišu efikasnost ostvaruju sa vrednostima koeficijenta viška vazduha λ koje se kreću u opsegu od 0,98 do 1,01, odnosno u oblastima bliskim stehiometrijskoj smeši λ≈1. Savremena teretna vozila opremljena su naprednim sistemima za naknadni tretman izduvnih gasova. Sastav sistema u zavisnosti je od zakonskih regulativa, tržišta, proizvođača vozila, vrste motora, primenjene tehnologije i zahtevanog stepena redukcije izduvne emisije i dr. (Vaneman, 1991; Haaß and Fuess, 2005; Ianoşev et. al., 2008; Feriyanto et. al., 2020; FPT, 2025).

U datom kontekstu na Slici 14. prikazan je primer sistema za naknadni tretman izduvnih gasova kod novijih teretnih vozila sa pogonom na dizel. Na slici je prikazana šema sistema u čijem sastavu su: oksidacioni katalizator (1), čija je uloga da hemijskim procesima redukuje emisiju, filter čestica čađi (2) čija je uloga da zadržava čestice i naknadnim ubrizgavanjem dodatnih količina goriva iste sagoreva. Zatim sledi sistem zasnovan na selektivnoj katalitičkoj redukciji (4), koji pomoću rastvora amonijaka (vodeni rastvor uree) (3) redukuje emisiju azotnih oksida, dok se oksidacija preostalog amonijaka vrši namenskim katalizatorom (5).



Slika 14. Šema sistema za naknadni tretman izduvnih gasova kod dizel motora *(Izvor: FPT, 2025)*

U svrhu preglednosti i samog konteksta rada, kao ilustracija u Tabeli 15. prikazana su najčešća tehnološka i konstrukciona rešenja za redukciju izduvne emisije u odnosu na norme, u motoru i nakon motora, kod terertnih vozila.

Tabela 15. Tehnološka i konstrukciona rešenja za redukciju izduvne emisije kod teretnih vozila

Sistem naknadnog tretmana	Vrsta motora	Opis
DOC *(engl. Diesel Oxidation Catalyst)*	Dizel motori	Proizvođači teretnih vozila kreću sa primenom DOC katalizatora od 2001. godine, uvođenjem Euro III norme, dok masovna primena kreće od Euro IV norme, gde postaje sastavni deo sistema koji čine EGR, SCR, filtera čestica čađi i dr. Zasnovan na principu redukcije NO, CO i (T)HC u NO_2, CO_2 i vodenu paru.[1,4]
EGR *(engl. Exhaust Gas Recirculation)*	Dizel motori	Recirkulacija izduvnih gasova EGR predstavlja tehnologiju zasnovanu na konstruktivnim poboljšanjima na samom motoru. Uobičajeni tok procesa funkcioniše tako što se deo izduvnih gasova, ohlađen primenom izmenjivača toplote, vraća u motor snižavajući temperaturu sagorevanja i emisiju NO_x. Najčešće se primenjuje u kombinaciji sa SCR i filterima čestica čađi. Od 2005. godine, uvođenjem Euro IV norme, počinje sa primenom.[1,4]
DPF *(engl. Diesel Particulate Filter)*	Dizel motori	Proizvođači vozila počinju da ga primenjuju od 2005. godine, uvođenjem Euro IV norme. Sistem funkcioniše na principu fizičkog zadržavanja čestica čađi. Poseduje mogućnost regeneracije, regeneracija se odvija primenom grejača, aditiva ili naknadnim ubrizgavanjem dodatnih količina goriva čime se čestice sagorevaju. Često se primenjuje u kombinaciji sa EGR, DOC, SCR i dr.[1,4]
TWC *(engl. Three-Way Catalyst)*	Oto motori	Proizvođači vozila počinju da ga primenjuju od 2005. godine, uvođenjem Euro V/EEV norme, posebno kod vozila sa pogonom na KPG. Najčešće se izvodi u zasebno ali prisutna su i izvođenja u kombinaciji sa oksidacionim katalizatorom, TWC i OC. Sistem funkcioniše na principu istovremene redukcije CO, (T)HC i NO_x u CO_2, vodu, N_2 i O_2.[1,3,4]

SCR *(engl. Selective Catalytic Reduction)*	Dizel motori/ Oto motori	Počinje da se primenjuje od 2008. godine, uvođenjem Euro V norme, zasnovan na principu redukcije NO_x u N_2 i O_2, pomoću rastvora amonijaka NH_3 i vode. Kod teretnih vozila Euro V norme i kasnijih najčešće se izvodi u kombinaciji sa EGR, DOC, DPF i dr. [1,2,4]
ASC *(engl. An ammonia slip catalyst)*	Dizel motori	Sistem ASC počinje da se primenjuje od 2013. godine, uvođenjem Euro VI norme i proizvođači ga najčešće izvode u kombinaciji sa SCR, DOC, DPF i dr. Sistem ASC posebno je dizajniran da nakon tretmana izduvnih gasova rastvorom amonijaka i vode, primenom katalizatora uklanja zaostali amonijak NH_3 u izduvnoj emisiji, pretvarajući ga u N_2 i vodu.[1,4]
Izvor: [1]Morgan, C. (2014). 40 Years of Cleaner Air: The evolution of the autocatalyst; [2]Lambert, (2019). Perspective on SCR NO x control for diesel vehicles; [3]Rood et. al., (2019). Recent advances in gasoline three-way catalyst formulation: A review; [4]Bao et. al., (2022). Exhaust gas after-treatment systems for gasoline and diesel vehicles.		

Polazeći od prethodnih analiza, kao i konteksta ovog rada u pogledu priloga izboru vozila i nadgradnji u svrhu ekološki i ekonomski održivog transporta opasne robe, pored konvencionog dizel goriva u radu se razmatra i gasovito gorivo, komprimovani prirodni gas. Primena elektropogona i vodonika za pogon teretnih vozila, i u najrazvijenijim državama sveta još uvek je u fazama uvođenja, dok usaglašavanja sa strogim zahtevima navedenim u Sporazumu (ECE/326 i 352), tek predstoje.

3.3 Metode ispitivanja motornih vozila

Ispitivanja motornih vozila prema svom cilju i sadržaju, primenjenim postupcima, mestu odvijanja itd., mogu biti različita, i u tom smislu posebno razlikujemo: razvojna ispitivanja, homologaciona, verifikaciona i eksploataciona ispitivanja. Razvojna ispitivanja spovode se u postupku projektovanja i konstruisanja vozila, sistema ili komponenti, sa ciljem podizanja kvaliteta proizvoda, odnosno unapređenja performansi, bezbednosti i usklađivanja sa propisima (Todorović, 1979; Hallsten, 2009; Šilić, 2010, Andreae and Sun, 2012). Homologaciona ispitivanja predstavljaju poseban vid provere određenih svojstava i osobina vozila, tj. postupaka sa kojima se potvrđuje da vozilo, sistem ili komponenta, ispunjava zahteve definisane u odnosu na međunarodne pravilnike o homologaciji, koje za Evropu utvrđuje Evropska komisija (Todorović, 1979; Hallsten, 2009; Šilić, 2010, Andreae and Sun, 2012). Verifikaciona ispitivanja primenjuju se u postupcima kontrole kvaliteta, tokom ili nakon proizvodnje, kao deo zakonskih ili internih procedura provera usaglašenosti proizvoda (Todorović, 1979; Hallsten, 2009; Šilić, 2010). Eksploataciona ispitivanja obuhvataju merenja i analizu određenih parametara koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila u realnim uslovima vožnje u svrhu identifikacije razlika u odnosu na laboratorijska ispitivanja. Eksploataciona ispitivanja imaju za cilj proveru i potvrdu da li vozila, sistemi ili komponente, održavaju kvalitet i tehničke karakteristike koje su utvrđene tokom homologacionih i razvojnih ispitivanja (Todorović, 1979; Hallsten, 2009; Šilić, 2010). Prema postupcima i mestu odvijanja, razlikujemo ispitivanja u stacionarnim i nestacionarnim uslovima rada, odnosno laboratorijska i putna ispitivanja na poligonima ili odabranim deonicama puta (Todorović, 1979; Hallsten, 2009; Šilić, 2010, Andreae and Sun, 2012). U vezi sa navedenim, važno je naglasiti da dobijeni rezultati merenja u velikoj meri zavise od primenjene opitne instalacije i mernih uređaja, i metode merenja. Zbog toga, bitno je jasno precizirati početne zahteve ispitivanja i zahtevanu tačnost merenja, tj. način na koji se mere pojedine veličine i sa kojom tačnošću, pre svega kako bi rezultati bili pouzdani i uporedivi (Todorović, 1979).

3.3.1 Metode ispitivanja izduvne emisije

Metode ispitivanja emisije izduvnih gasova i potrošnje goriva kod motornih vozila standardizovane su na međunarodnom i nacionalnom nivou, ali se mogu definisati i sprovoditi na internom nivou, prema specifičnim zahtevima istraživanja (Todorović, 1979; Hallsten, 2009; Ivković, 2012). U zavisnosti od početnih zahteva i neposrednog cilja, ispitivanja se mogu izvoditi u laboratorijskim uslovima (primenom motorskih ili šasijskih dinamometara), putnim merenjima (na odabranim deonicama puta ili zatvorenim poligonima) ili primenom savremenih softverskih rešenja. Svaka metoda ispitivanja i merenja sadrži određene varijabilne elemente, poput postupka pripreme (motora ili vozila za ispitivanje, referentnih goriva, uslova okoline i dr.), potrebne opitne instalacije i mernih uređaja, načina merenja mernih veličina, uslove pod kojima se obavljaju merenja (stacionarni ili nestacionarni uslovi), načina prikazivanja i obrada rezultata merenja i dr. (Todorović, 1979; Hallsten, 2009; Šilić, 2010; Andreae and Sun, 2012; Ivković, 2012; Dornoff and Rodríguez, 2024).

U odnosu na objekat i primenjenu mernu instalaciju, ispitivanja se mogu sprovoditi, u stacionarnim ili nestacionarnim uslovima rada, na kompletnim vozilima (primenom šasijskih dinamometara) ili na motorima (primenom probnih stolova sa kojima se simuliraju spoljnja opterećenja, tj. motorski dinamometri, u literaturi prisutni su i nazivi motorske kočnice). Uslovi rada pod kojima se ispitivanja spovode predstavljaju veoma važan zahtev u svakoj od metoda ispitivanja, od kojeg u velikoj meri zavise konačni rezultati merenja (Todorović, 1979; Tomić i Petrović, 2000; Hallsten, 2009). Stacionarna ispitivanja odvijaju se u laboratorijski kontrolisanim uslovima primenom motorskih dinamometara na ustaljenom režimu rada i temperaturnom stanju motora. Pogodna su za merenja pogonskih karakteristika motora, poput brzinske karakteristike, karakteristike opterećenja i dr., detaljno navedeno u poglavlju rada model procene potrošnje goriva. Nestacionarna ispitivanja se primenjuju kada stacionarna nisu dovoljna za punu ocenu ekonomičnosti (ili neke druge karaktersitike) motora ili vozila u celini. Načelno se mogu podeliti na laboratorijska ispitivanja, primenom motorskih ili šasijskih dinamometara, i putna ispitivanja. Ključne razlike između ispitivanja kompletnih vozila, primenom šasijskih dinamometara i putnih merenja, ogledaju se u načinu i uslovima u kojima se izvođe testovi. U slučaju merenja određenih fizičkih veličina primenom šasijskih dinamometara, predmetna ispitivanja se obavljaju u laboratorijskim kontrolisanim uslovima, zbog čega nije moguće u potpunosti predvideti uticaje koji proizilaze od: atmosferskih uslova, promene pritiska i temperature, stanja i vrste kolovozne konstrukcije, međusobnih uticaja vozila u saobraćajnom toku i dr. U datom kontekstu, osnovni razlog uvođenja ispitivanja u nestacionarnim uslovima rada u odnosu na stacionarna je potreba da se u što većoj meri obuhvate sve promene i složenosti koje potiču od realnih uslova eksploatacije vozila. Imajući u vidu prethodno navedeno, savremene laboratorije u svetu opremljene su potrebnom opitnom instalacijom, motorskim i/ili šasijskim dinamometrima čiji je rad elektronski kontrolisan, za različite režime ispitivanja (stacionarni ili nestacionarni) prema definisanim promenama radnih parametara u vremenu (voznim ciklusima). Trenutno u je svetu prisutno više vrsta i generacija voznih ciklusa, pre svega zbog različitih zahteva i propisa koji važe u različitim delovima sveta.

Saglasno sa prethodnim analizama o zastupljenosti pogonskih goriva na različitim tržištima, u Tabeli 16. navedeni su najčešći vozni ciklusi koji se primenjuju u postupcima ispitivanja izduvne emisije, za nestacionarne uslove rada, kod motornih teretnih vozila na tržištu Sjedinjenih Američkih Država, Evrope i Narodne Republike Kine. Važno je i istaći da pomenuti vozni ciklusi, razvijani i standardizovani za postupke ispitivanja i sertifikacije emisije izduvnih gasova, mogu primenjivati i za šira tehnička ispitivanja, poput merenja i

analize potrošnje goriva, ispitivanja performansi sistema za naknadni tretman izduvnih gasova i dr.

Tabela 16. Vozni ciklusi koji se primenjuju u postupcima ispitivanja izduvne emisije motornih teretnih vozila

Naziv ciklusa	Tržište	Opis
FTP Transient *(engl: Federal Test Procedure)*	Sjedinjene Američke Države	Ciklus FTP predstavlja nestacionarni test ciklus, namenjen postupcima regulatornih ispitivanja izduvne emisije kod teških teretnih vozila i autobusa primenom šasijskih dinamometara. Razvijen je na osnovu ciklusa za teška teretna vozila HD–UDDS *(engl: Heavy–Duty Urban Dynamometer Driving Schedule)*. Primenjuje se na sve vrste goriva, uključujući i alternativna goriva. Ciklus je namenjen da simulira uslove gradske i međugradske vožnje sa različitim fazama opterećenja, uključujući hladni i topli start. Vreme trajanja ciklusa iznosi 1200 s, prosečna brzina tokom ispitivanja iznosi oko 30 km/h, a pređena udaljenost oko 10 km [1,2].
ETC *(engl: European Transient Cycle)*	Evropa	U skladu sa Direktivama[3, 4], ETC ciklus je uveden zajedno sa ESC *(engl: European Stationary Cycle)* za potrebe ispitivanja i sertifikacije izduvne emisije dizel motora kod teških teretnih vozila. Ciklusi ETC i ESC zamenili su raniji ECE R–49 test ciklus, i primenjivali su se do Euro V norme. Primenjuje se na sve vrste goriva, uključujući i alternativna goriva. Osnovu za razvoj ETC i ESC ciklusa predstavlja razvojni put FIGE instituta. FIGE institut je razvio ciklus ispitivanja za primenu na šasijskim i motorskim dinamometrima (uključujući i teretna vozila sa pogonom na gasovita goriva) na osnovu iskustava ispitivanja u realnim uslovima vožnje. ETC ciklus sastoji se od tri podjednake faze, koje reprezentuju gradske i međugradske uslove vožnje, kao i vožnju na otvorenom putu. Vreme trajanja ciklusa iznosi 1800 s, prosečna brzina tokom ispitivanja po fazama iznosi oko 50 km/h za gradske uslove, oko 70 km/h za međugradske i oko 88 km/h i vožnju na autoputu[1, 3, 4, 5].
WHVC *(engl: World Harmonized Vehicle Cycle)*	Evropa	U cilju prevazilaženja razlika između voznih ciklusa, za potrebe ispitivanja i sertifikacije izduvne emisije motora teretnih vozila primenom motorskih dinamometara, razvijeni su WHSC *(engl: World Harmonized Stationary Cycle)* i WHTC *(engl: World Harmonized Transient Cycle)* ciklusi. Ciklusi su definisani u okviru pravilnika GTR *(engl: Global Technical Regulation)*, kojim su obuhvaćeni zahtevi po pitanju emisije izduvnih gasova kod teških teretnih vozila[5]. Na osnovu iskustava razvijenih ciklusa WHSC i WHTC, za potrebe ispitivanja i sertifikacije kompletnih vozila primenom šasijskog dinamometara, razvijen je WHVC ciklus. Razvijeni ciklusi se primenjuju na sve vrste goriva, uključujući i alternativna goriva. WHVC ciklus podeljen je u tri segmenta, koji reprezentuju gradske i međugradske uslove vožnje, kao i vožnju na otvorenom putu. Vreme trajanja iznosi 1800 s, prosečne brzine tokom ispitivanja po segmentima, iznose: oko 21 km/h za gradske uslove, 44 km/h za međugradske i oko 77 km/h na autoputu. Ukupna pređena udaljenost iznosi 20 km[1, 5].
CHTC *(engl: China Heavy-Duty Commercial Vehicle Test Cycle)*	Narodna Republika Kina	Ciklus CHTC je namenjen za ispitivanja primenom šasijskih dinamometara, namenski je razvijen i prilagođen kineskim uslovima eksploatacije, tj. razvijen je za šest različitih segmenata ispitivanja (obuhvatajući laka i teška teretna vozila, autobuse, skupove vozila i dr.)[6]. Razvijen je na osnovu WHVC ciklusa i prve verzije ovog ciklusa poznate pod nazivom C–WHVC *(engl: China World Harmonized Vehicle Cycle)*. Primenjuje se na sve vrste goriva, uključujući i alternativna goriva. U zavisnosti od vrste vozila, vreme trajanja ciklusa iznosi od 1310 s do 1800 s, svaki ciklus podeljen je u tri segmenta, koji reprezentuju gradske i međugradske uslove vožnje, kao i uslove vožnje na autoputu[1,6].

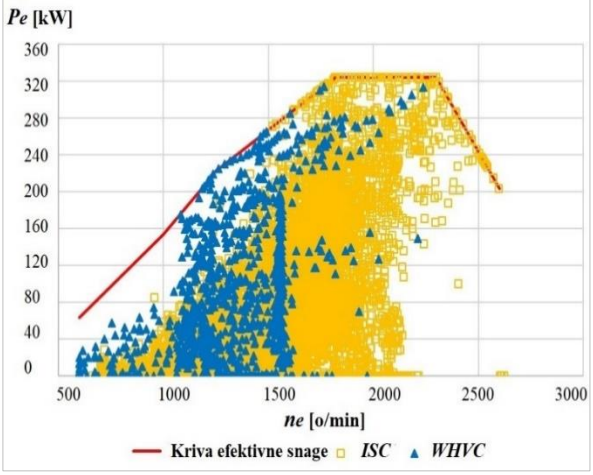
Izvor:
[1] Phinia, 2024. Worldwide Heavy-Duty And Off-Road Emission Standards, On-Road Heavy–Duty Vehicles And Engines, Off-Road/Non–Road Vehicles, Engines And Equipment.
[2] EPA, 2020. Improvements for heavy–duty engine and vehicle test procedures, and other technical amendments;
[3] Direktive 1999/96/EC i 2005/55/EC of the European Parliament and of the Council;
[4] Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council;
[5] Global Technical Regulation. GTR R4, 2021;
[6] SAC, 2019. China automotive test cycle–Part 2: Heavy–duty commercial vehicles.

Pored laboratorijskih ispitivanja (zasnovanih na primeni motorskih i šasijskih dinamometara) u procesima istraživanja i razvoja, prisutna su i putna merenja, koja za cilj imaju simulaciju realnih uslova vožnje, poput ispitivanja usaglašenosti u eksploataciji ISC. Aktuelna istraživanja na temu merenja izduvne emisije i potrošnje goriva u realnim uslovima vožnje, podstiču ubrzan razvoj prenosnih uređaja, poput prenosnih analizatora PEMS sa kojima je moguće posredno utvrditi i potrošnju goriva preko emisije CO_2 (Weller et. al., 2019; Mrđa, 2020; Pavlovic, Fontaras, Broekaert, Ciuffo, Ktistakis and Grigoratos, 2021; Ziółkowski, Fuć, Jagielski and Bednarek, 2022). Važno je istaći da tačnost merenja zavisi od tačnosti primenjenog prenosnog uređaja. S tim u vezi, stupanjem na snagu Uredbe (582/2011/EC), kojom se utvrđuju zahtevi za odobrenje tipa vozila i motora, uvedene su smernice za primenu faktora usaglašenosti *(engl.*

conformity factor). Faktora koji se uvodi kao popravni faktor prilikom poređenja vrednosti merenja dobijenih u realnim uslovima vožnje sa vrednostima dobijenih primenom standardnih laboratorijskih metoda. Cilj Evropske komisije je da se faktor usaglašenosti postepeno ukine, kako se kvalitet, tačnost merne opreme i postupci izvođenja merenja u realnim uslovima povećaju.

Kako je ranije u tekstu istaknuto, ispitivanja u laboratorijskim uslovima, iako pružaju standardizovane i ponovljive uslove za merenja emisije izduvnih gasova i potrošnje goriva, imaju određena ograničenja, tj. nisu u mogućnosti da u potpunosti predvide složenost realnih uslova eksploatacije. Pre svega, subjektivnog uticaja vozača i međusobne uticaje vozila u saobraćajnom toku, odnosno njihove uticaje na režim kretanja vozila, itd. Nasuprot tome, ispitivanja koja simuliraju realne vozne uslove, primenom nestandardnih test ciklusa OCE ili ispitivanja usaglašenosti u eksploataciji ISC, uključuju brojne faktore koji se javljaju tokom same vožnje, a koji značajno utiču na promene režima rada motora, usled kojih dolazi odstupanja u izmerenim vrednostima emisije i potrošnje goriva.

U saglasnosti sa prethodno navedenim, pre svega postupcima ispitivanja teretnih vozila, na Slici 15. prikazane su razlike u zastupljenosti radnih režima motora za uslove ispitivanja u laboratorijskim uslovima primenom test ciklusa WHVC na šasijskom dinanometru i ispitivanja usaglašenosti u eksploataciji ISC na poligonu (Weller et. al., 2019; Weller, 2020). Na slici konturnom crvenom linijom prikazana je zavisnosti efektivne snage P_e od broja obrtaja kolenastog vratila n_e, a površinama ispod konturne linije, grafički, prikazana je zastupljenost radnih režima motora tokom ispitivanja (plavom bojom za WHVC, odnosno narandžastom za ISC). Rezultati merenja, zastupljenosti radnih režima motora (položaja regulacionog uređaja/papučice gasa od broja obrtaja kolenastog vratila), ostvareni u laboratorijskim uslovima značajno odstupaju od rezultata ostvarenih na poligonu. Razlike prikazane na na Slici 15., istaknute su prvenstveno zbog ilustracije zastupljenosti radnih režima motora teretnog vozila tokom ispitivanja u laboratorijskim uslovima primenom šasijskog dinamometra i ispitivanja na poligonu. Cilj je da se istakne uticaj vozača na promenu režima rada motora, posebno u konteksu teme rada i složenosti predviđanja uticaja vozača, kao i međusobnih uticaja vozila u saobraćajnom toku, na potrošnju goriva. U navedenom kontekstu, radi simulacije što približnijih realnih uslova eksploatacije i režima rada, u radu razvijeni modeli, procene potrošnje goriva i izduvne emisije gasova i njenih troškova, koriste popravne (korekcione) faktore.



Slika 15. Poređenje zastupljenosti radnog režima motora za testove WHVC i ISC *(Izvor: Weller, 2020)*

3.3.2 Metode merenja potrošnje goriva

Kako je pomenuto u prethodnom odeljku, u zavisnosti od početnih zahteva i neposrednog cilja istraživanja, merenje potrošnje goriva kod vozila moguće je sprovoditi u laboratorijskim uslovima, putnim merenjima ili primenom savremenih softverskih rešenja. Merenja se izvode korišćenjem različitih metoda koje se prvenstveno razlikuju u postupcima

merenja, primenjenoj opitnoj instalaciji, mernim uređajima, načinu prikazivanja i obrade rezultata i dr. Takođe, merenja se mogu sprovoditi prema definisanim međunarodnim voznim ciklusima ili specifičnim zahtevima istraživanja, za različite stepene složenosti i dužine trajanja (Todorović, 1979; Hallsten, 2009; Ragon and Rodríguez, 2021; Rexeis, 2021). Merenje potrošnje goriva može se vršiti na dva osnovna načina, volumetrijski i maseno. Kod volumetrijskog merenja, potrošnja goriva određuje se u zapreminskim jedinicama i izražava u litrima ili kubnim metrima, dok kod masenog merenja, potrošnja se određuje na osnovu utrošene mase goriva i izražava u gramima ili kilogramima (Hallsten, 2009).

Prema postupcima merenja, opitnoj instalaciji i mernim uređajima, razlikujemo direktna i indirektna (posredna) merenja. Direktna merenja, podrazumevaju primenu instalacije i uređaja, kod kojih se merene veličine dobijaju neposrednim očitavanjem sa instalacije ili mernih uređaja. Primeri metoda zasnovanih na direktnim merenjima su: metoda merenja zasnovana na očitavanju vrednosti senzora nivoa napunjenosti rezervoara FLS *(engl. Fuel level sensor)*, zatim metoda zasnovana na očitavanju vrednosti protokomera FFM *(engl. Fuel flow metering)*, kao i metoda očitavanja količine goriva u rezervoaru tokom punjenja i dr. (Hallsten, 2009; Ragon and Rodríguez, 2021; Rexeis, 2021;Pavlovic et. al., 2021).

S druge strane, kod posrednih merenja vrednost tražene veličine se određuje proračunom, odnosno funkcionalnom zavisnošću između izmerenih vrednosti drugih fizičkih veličina i tražene veličine, tj. potrošnje goriva. Primeri metoda zasnovanih na posrednim merenjima su: metoda izračunavanja potrošnje goriva na osnovu podataka o emisiji CO_2 dobijenih preko uređaja PEMS, ili metoda zasnovana na primeni prenosnog dijagnostičkog uređaja koji putem odgovarajućeg komunikacijskog protokola i OBD konektora pristupa podacima EUJ *(Elektronska Upravljačka Jedinica)*, očitavajući podatake o časovnoj potrošnji goriva, ciklusnoj ubrizganoj količini goriva i dr. Takođe, posredna merenja se mogu vršiti i metodama zasnovanim na primeni savremenih softverskih rešenja, poput VECTO *(engl. Vehicle Energy Consumption calculation Tool)* ili sistema OBFCM *(engl. On–Board Fuel Consumption Monitoring)* i sličnih, koji očitavaju trenutne podatake o potrošnji goriva i emisiji CO_2. (Hallsten, 2009; Ragon and Rodríguez, 2021; Rexeis, 2021; Pavlovic et. al., 2021; 2017/2400/EC; 2019/1242/EC; 2024/1610/EC). Naime, Evropska komisija usvojila je obavezujuće dokumente i strategije sa jasnim ciljevima za smanjenje emisije CO_2 i potrošnje goriva kod teških teretnih vozila u periodu od 2025. do 2030. godine. Navedeni ciljevi definisani su Uredbom (595/2009/EC) i nadovezujućim izmenama i dopunama o postupcima za određivanje emisije CO_2 i potrošnje goriva uz primenu softverskih rešenja (2017/2400/EC), odnosno o postupcima za utvrđivanje, praćenje i izveštavanje o emisiji CO_2 i potrošnji goriva kod teretnih vozila, sadržano u (2019/1242/EC; 2024/1610/EC). Usaglašenost sa ovim ciljevima, kod novoproizvedenih teretnih vozila, utvrđuju se na osnovu izveštaja o praćenju emisije CO_2 i potrošnje goriva primenom savremenog softverskog rešenja VECTO i ispitivanja u realnim uslovima vožnje (Ragon and Rodríguez, 2021). Prateći zadate ciljeve, Evropska komisija usvojila je i Uredbe (2018/1832/EC; 2025/2161/EC) koje propisuju postupke za kontinuirani nadzor potrošnje goriva i emisije CO_2 na teretnim vozilima kroz primenu sistema OBFCM. Dok se tačnost izmerenih vrednosti primenom OBFCM sistema verifikuje standardizovanim metodama merenja potrošnje i kreće se u opsegu ±5% (Ragon and Rodríguez, 2021; Rexeis, 2021; Pavlovic et. al., 2021).

U Tabeli 17. navedene su najčešće primenjivane metode za merenje potrošnje goriva kod vozila, dati su njihovi opisi, postupci i način merenja.

Tabela 17. Pregled metoda za merenje potrošnje goriva		
Naziv metode /postupci i način merenja	Tip uređaja/oprema	Opis
FLS *(engl. Fuel level sensor)* direktna, volumetrijska metoda.	Uređaj na vozilu. Oprema uključuje prenosni uređaj za očitavanje podataka dobijenih od davača nivoa napunjenosti rezervoara, prateće komponente, navigacioni uređaj i softver za obradu podataka.	Metoda FLS zasnovana je na direktnom merenju potrošnje goriva na osnovu podataka dobijenih od senzora nivoa napunjenosti rezervoara (kapacitivnog senzora nivoa FLS). Princip rada zasniva se na podacima dobijenim o trenutnom nivou goriva u rezervoaru od dva ili više senzora. Promenom nivoa goriva menja se i kapacitet, što za posledicu, ima pojavu električnog signala na izlazu. Na osnovu poznatih karakteristika (geometrije) rezervoara dobijeni električni signal se putem prenosnih uređaja konvertuje u zapreminu goriva na osnovu koje se određuje napunjenost rezervoara. Podaci sa davača nivoa goriva prenose se putem komunikacionog uređaja do interne platforme za obradu podataka, a procena potrošnja goriva vrši se na osnovu razlike između početne i krajnje količine goriva u rezervoaru tokom posmatranog perioda. Merna nesigurnost uslovljena je brojem davača i iznosi oko ±1% [1, 2]. Metoda primenu nalazi u postupcima verifikacionih i eksploatacionih ispitivanja. Osnovne prednosti metode su relativno jednostavna instalacija merne opreme i otpornost na nečistoće, što je čini pogodnom za primenu u realnim uslovima vožnje. Takođe, metoda omogućava direktno poređenje zapremine goriva sa metodom očitavanja količine goriva u rezervoaru tokom punjenja. Kao osnovna ograničenja metode, navode se visoki troškovi merne opreme i primena na tečna goriva (za gasovita goriva primenjuju se postupci zasnovani na razlici pritiska u rezervoarima [1, 2]).
FFM *(engl. Fuel flow metering)* direktna, volumetrijska / masena metoda.	Uređaj na vozilu. Oprema uključuje prenosni uređaj za očitavanje podataka dobijenih od davača nivoa napunjenosti rezervoara, prateće komponente, navigacioni uređaj i softver za obradu podataka.	Metoda FFM zasnovana je na direktnom merenju potrošnje goriva na osnovu podataka dobijenih od uređaja za merenje protoka. U zavisnosti od primenjenih uređaja, metoda može funkcionisati na volumetrijskom ili masenom principu merenja. Volumetrijsko merenje protoka zasniva se na detektovanju implusa koje generiše Halov *(engl. Hall)* davač ugrađen u kućištu protokomera, tj. od rotirajućeg elementa koji se pokreće prolaskom goriva kroz protokomer (turbinu), na taj način određujući zapreminu goriva koji protiče kroz njega. Maseno merenje protoka zasniva se na primeni Koriolisovog *(engl. Coriolis)* protokomera, čiji je princip rada zasnovan na merenju ugla zakretanja, promeni u fazi oscilacija (Koriolisov efekat), a koji zavisi od protoka. Merna nesigurnost uslovljena je proizvođačem protokomera, odnosno brojem implusa/oscilacija po količini goriva koje prođe kroz uređaj i iznosi oko ±1% [1, 2, 3]. Metoda svoju primenu nalazi u postupcima verifikacionih i eksploatacionih ispitivanja. Prednosti, kao i kod FLS metode, relativno jednostavna instalacija sistema za merenje, sistem nije oseljiv na nečistoće, što ga čini pogodnim za primenu u realnim uslovima vožnje. U zavisnosti od principa merenja, Koriolisov protokomer izračunava maseni protok direktno, nezavisno od gustine i temperature, dok u slučaju volumetrijskog protokomera, da bi se dobila masa goriva vrši se korekcija prema gustini i temperaturi. Ograničenja metode su visoki troškovi uređaja, protokomera i primena na tečna goriva (za gasovita goriva primenjuju se i postupci zasnovani na razlici pritiska u rezervoarima) [1 ,2, 3].
Metoda očitavanja količine goriva u rezervoaru tokom punjenja, direktna, volumetrijska metoda.	Uređaj na vozilu i podaci sa stanice za snabdevanje gorivom.	Metoda očitavanja količine pogonskog goriva u rezervoaru tokom punjenja, predstavlja najjednostavniju praktičnu metodu za merenje potrošnje goriva, koja je zasnovana na direktnom očitavanju na stanici za snabdevanje gorivom i podataka sa kontrolne table vozila [1, 4]. Ovaj postupak se spovodi tako što pre početka vožnje, rezervoari na vozilu se napune u potpunosti, pri čemu se zabeleže očitane vrednosti na stanici za snabdevanje, vrednosti sa kontrolne table vozila, referentna goriva, temperaturni uslovi tokom punjenja i dr. Na osnovu poznatih karakteristika rezervoara, gustine goriva, temperaturnih uslova i dr., preračunava se količina goriva u rezervoaru. Nakon pređene određene udaljenosti, očitane na odometru vozila i GPS uređaju, vozilo se dopunjuje gorivom, a dobijena razlika se koristi za proračun potrošnje. Merna nesigurnost metode iznosi oko ±6% [1, 2, 4]. Svoju primenu nalazi u postupcima eksploatacionih ispitivanja, validacije rezultata, pre svega kao dodatna metoda. Osnovne prednosti metode su dostupnost i jednostavna primena, što je čini pogodnom za primenu u realnim uslovima vožnje. Osnovna ograničenja metode odnose se na podatke o fizičko–hemijskim svojstvima goriva u podzemnim rezervoarima stanica za snabdevanje, koji često nisu dostupni. Takođe, tačnost metode je uslovljena nagibima podloge tokom merenja i dr. Očitavanja sa stanica za snabdevanje mogu da budu neprecizna, u datom kontekstu a cilju sprečavanja nepravilnosti u očitavanju, stanice su uslovljene redovnim zakonskim kontrolama uređaja za točenje goriva, čija je merna nesigurnost zakonski ograničena na ±0,5% [5, 6]. U skladu sa ograničenjima, preporuke za primenu metode su na trasama sa ponavljajućim putem i istim stanicama za snabdevanje gorivom [1, 4].
Metoda OBFCM posredna, volumetrijska / masena.	Uređaj u vozilu, koji pristupa podacima EUJ, prateći i prikupljajući	Metoda OBFCM zasnovana je na obaveznom sistemu na vozilima u Evropskoj uniji, koji omogućava nadzor, prikupljanje i čuvanje podataka o potrošnji goriva i emisiji CO_2 tokom ekspoatacije vozila. Metoda je zasnovana na merenju trenutne potrošnje goriva i emisije CO_2 na osnovu podataka iz EUJ u vozilu[1, 2]. Primarna funkcija EUJ je upravljanje radom motora preko motorskih aktuatora ali i pratećih sistema na vozilima. Princip rada se

	podatke o potrošnji goriva, pređenom putu i dr.	ostvaruje posredstvom povratnih informacija dobijenih sa davača/senzora merenja opterećenja motora, odnosno broja obrtaja kolenastog vratila, masenog protoka vazduha, prisustva kiseonika u izduvnom sistemu, temperature i dr. Na osnovu navedenih podataka, EUJ vrši regulaciju vremena otvaranja brizgaljki i količina ubrizganog goriva. Metodom se može pratiti veliki broj parametara (broj obrtaja kolenastog vratila, temperatura, maseni protok goriva, brzina vozila, pređena udaljenost, izduvna emisija i dr.), uključujući i potrošnju goriva i emisiju CO_2. Merna nesigurnost metode iznosi oko ±5% [1, 2, 3]. Primenjuje se u skladu sa zakonskim regulativama, pre svega u nadzoru potrošnje goriva i emisije CO_2, zatim u postupcima verifikacionih i eksploatacionih ispitivanja. Rezultati se koriste za analizu potrošnje goriva i emisije u realnim uslovima eksploatacije ili u specifičnim postupcima ispitivanja, gde nije potrebna primena laboratorijskih merenja. Takođe, pretpostavka je da će svoju primenu nalaziti u i postupcima upravljanja voznim parkovima. Kao osnovna ograničenja metode navode se nedovoljna rasprostranjenost (nije dostupan za vozila starije proizvodnje), tačnost zavisi od davača i fabričke instalacije (karakteristike davača i prenosna funkcija nisu poznate), potrošnja goriva i emisija CO_2 se preračunavaju na osnovu vremena i protoka (zasnovana na modelima).
Metoda zasnovana na primeni prenosnog dijagnostičkog uređaja, posredna, volumetrijska / masena.	Prenosni uređaj. Oprema uključuje prenosne uređaje koji putem OBD/CAN pristupaju podacima EUJ, prateće komponente, navigacioni uređaj i softver za obradu podataka.	Metoda zasnovana na primeni prenosnog dijagnostičkog uređaja koji putem dijagnostičkog konektora OBD pristupa podacima EUJ. Prenosni uređaj povezuje se na šesnaestopinski OBD II tip B konektor, koji putem odgovarajućeg protokola (ISO 9141, ISO 14230, ISO 15765, J1939, J1850 i dr.) pristupa podacima EUJ (broju obrtaja kolenastog vratila, masenom protoku vazduha, količini ubrizganog goriva, prisustvu kiseonika u izduvnom sistemu, temperaturi rashladne tečnosti, ciklusnoj ubrizganoj količini goriva, vremenu ubrizgavanja goriva, časovnoj potrošnji, izduvnoj emisiji i dr.) [7, 8]. Merna nesigurnost metode u zavisnosti je od dijagnostičkog uređaja i kreće se u opsegu ±6% [1, 2, 3, 4, 7, 8]. Primenjuje se u postupcima nadzora potrošnje goriva i emisije CO_2, zatim u postupcima verifikacionih i eksploatacionih ispitivanja, kao i prema specifičnim zahtevima istraživanja. Prednosti, praćenje potrošnje u realnom vremenu, dostupnost prenosivih uređaja i jednostavna primena. Kao osnovna ograničenja, navode se troškovi, koji su u zavisnosti od primenjenog prenosnog uređaja, kao i tačnost merenja koja je u zavisnosti od prenosnog uređaja i kalibracije sistema od strane proizvođača vozila (karakteristike davača i prenosne funkcije nisu poznate u vozilu).
Metoda PEMS posredna, masena.	Prenosni uređaj. Oprema uključuje analizatore i protokomere, prateće komponente, uređaj za navigaciju i softver za obradu podataka.	Metoda PEMS zasnovana je na kombinovanom principu merenja, tj. merenju protoka izduvnih gasova i sastava gasnih komponenti. Merni uređaji (protokomeri) mere ukupan maseni protok izduvnih gasova, a uređaji (analizatori izduvnih gasova) mere trenutne koncentracije zagađivača. Izduvna emisija, masene koncentracije određenih zagađivača, određuju se preciznim usklađivanjem ovih signala koji se istovremeno beleže [1, 2, 4, 9, 10]. Potrošnja goriva se izračunava indirektno, primenom postupka analize ravnoteže ugljenika *(engl: Carbon Balance Analysis)*, gde se na osnovu sastava izduvnih gasova, tj. udela CO_2 preračunava potrošnja na osnovu mase ugljenika, tj. odnosa vodonika prema ugljeniku, kiseonika prema ugljeniku i dr. Parametri koji se utvrđuju metodom, zagađivači: CO_2, CO, NO_x, HC i dr. Tipična merna nesigurnost metode iznosi oko ±3% [1, 2, 9, 10]. Metoda se izvodi u skladu sa voznim ciklusima i sa specifičnim ciljevima istraživanja. Svoju primenu nalazi u postupcima homologacionih, verifikacionih i eksploatacionih ispitivanja. Prednosti su praćenje emisije izduvnih gasova u realnom vremenu i olakšana primena, zbog relativno malih dimenzija prenosivih uređaja. Kao osnovna ograničenja navode se visoki troškovi uređaja i kalibracija sistema od strane proizvođača.

Izvori:
[1] Ragon and Rodríguez, 2021. Avoiding a gap between certified and real–world CO_2 emissions: Technical considerations for on–board fuel consumption measurements in trucks;
[2] Rexeis, 2021. Measuring the fuel consumption of light and heavy duty vehicles and monitoring their real world fuel consumption;
[3] Scintex Engine Fuel Flow Meter and Consumption Kit. https://www.mz-at.de/en;
[4] American Automobile Association, 2021. Accuracy of in dash fuel estimates;
[5] Ministarstvo privrede. Pravilnik o overavanju merila i mernih sistema za neprekidno i dinamičko merenje količina tečnosti koje nisu voda–uređaji za točenje goriva, 2023;
[6] Ministarstvo privrede. Pravilnik o vrstama merila koja podležu zakonskoj kontroli, 2020;
[7] Pavlovic et. al., 2021. How accurately can we measure vehicle fuel consumption in real world operation?;
[8] Schäffer, 2021. Dijagnoza vozila uz pomoć OBD II;
[9] HORIBA. OBS–ONE GS: On–board emissions measurement system. https://www.horiba.com;
[10] Ziółkowski et. al., 2022. Analysis of emissions and fuel consumption in freight transport.

U zavisnosti od primenjene metode, merne instalacije i uređaja, tačnost izlaznih rezultata može varirati i kreće se u opsegu od 1% do 6% (Hallsten, 2009; Ragon and Rodríguez, 2021; Rexeis, 2021; Pavlovic et. al., 2021). Polazeći od svojstava metoda za merenje potrošnje goriva navedenih u Tabeli 17, kao i konteksta ovog rada u pogledu doprinosa izboru vozila i nadgradnji sa stanovišta pogonskih goriva i materijala izrade, u radu su razmatrane dve metode za utvrđivanje potrošnje goriva. Metoda zasnovana na primeni prenosnog dijagnostičkog uređaja koji putem OBD konektora pristupa podacima EUJ, kao i metoda očitavanja količine

goriva u rezervoaru tokom punjenja na stanici za snabdevanje. Prilikom razmatranja primenjenih metoda, uzeti su u obzir ciljevi istraživanja, raspoloživi vozni resursi, konstrukcione karakteristike vozila i nadgradnji, i posebno transportni uslovi, gde je mesto utovara robe ujedno i stanica za snabdevanje gorivom, kao i dostupnost merne opreme, zahtevana tačnost, vreme sprovođenja istraživanja i dr. Shodno prethodno navedenom, u narednom odeljku rada, u cilju pojašnjenja odabranih metoda, opisana je primena dijagnostičkih uređaja koji putem OBD konektora pristupaju podacima EUJ vozila.

3.3.2.1 Dijagnostika motornih vozila

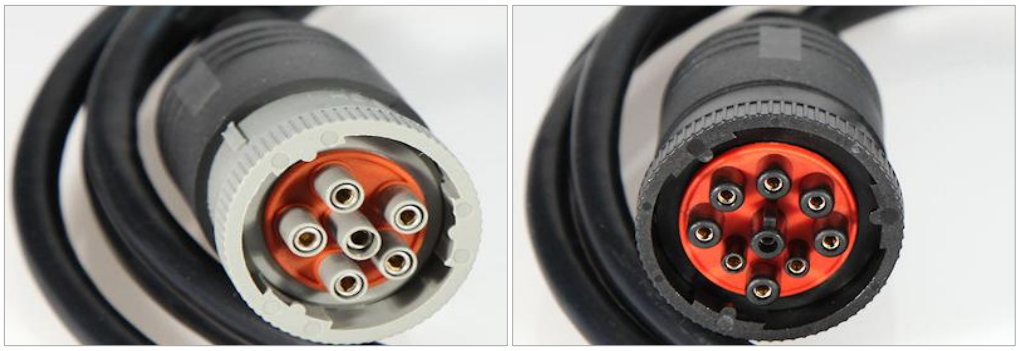
Zahtevi za univerzalni sistem na vozilu koji ima mogućnost dijagnostike nepravilnosti u radu, zatim praćenja i provere usklađenosti graničnih vrednosti emisije izduvnih gasova, radnih parametara motora, sistema na vozilu i dr., u svrhu pojednostavljenja upotrebe u postupcima odobrenja tipa, kontrole izduvne emisije, tehničke kontrole i održavanja, datiraju još od 1985. godine (Krstić, 2009; Schäffer, 2021). Prvi pokušaji standardizacije sistema za dijagnostiku vozila i primena jedinstvenog dijagnostičkog priključka OBD I, počinje da se primenjuje u Sjedinjenim Američkim Državama od 1988. godine. Tehnološki, ti sistemi nisu bili naročiti efikasni i omogućavali su samo nadzor ograničenog broja parametara izduvne emisije i radnih parametara motora, bez mogućnosti praćenja u realnom vremenu. Pored navedenog, na smanjenu efikasnost sistema uticao je i veliki broj proizvođača vozila, kao i nedostatak standardizovanog komunikacijskog protokola i razlike u dijagnostičkim konektorima koje su dodatno otežavale postupke dijagnostike vozila. Uvođenjem dijagnostičkog sistema druge generacije OBD II, od 1996. godine, uspostavljeni su standardi za dijagnostiku vozila i standardizovani su komunikacijski protokoli i dijagnostički konektori, čime je omogućena kompatibilnost dijagnostičkih sistema, uređaja i vozila različitih proizvođača. Sistemi zasnovani na drugoj generaciji omogućavali su pristup i informacije od različitih sistema na vozilu u realnom vremenu, uključujući nadzor graničnih vrednosti emisije izduvnih gasova, radnih parametra motora, transmisije i dr. (Krstić, 2009; Posada and Bandivadekar, 2015; Schäffer, 2021; Miller, Sen and Teter, 2024; CARB, 2025).

Dijagnostički sistem druge generacije na tržištu Evropske unije (eOBD II) počinje da se primenjuje na putničkim vozilima sa oto motorima od 2001. godine, a od 2003. godine na putničkim vozilima sa dizel motorima, i predstavlja evropsku verziju OBD II sistema. S druge strane, kod teretnih vozila (u literaturi prisutni su nazivi i HD OBD II) sistem se uvodio postepeno po fazama, pri čemu je svaka naredna faza proširivala obim dijagnostičkih funkcija, a zahtevi su definisani kroz više zakonodavnih obavezujućih dokumenta (Posada and Bandivadekar, 2015; Schäffer, 2021; Miller et. al., 2024). Prva faza počela je da se primenjuje od 2005. godine, u skladu sa Euro IV normom. Dijagnostičke funkcije sistema omogućavale su pristup i informacije o sistemima na vozilu, poput pogonskog sistema i sistema za naknadni tretman izduvnih gasova, pružajući podatke o radnim parametrima motora i transmisije, podatke o graničnim vrednosti emisije izduvnih gasova zatim i dr. Druga faza počela je da se primenjuje od 2008. godine, uvođenjem Euro V norme. Pored navedenih dijagnostičkih funkcija u fazi jedan, faza dva obuhvatala je i proširenje zahteva za standardizaciju komunikacijskih protokola i konektora u svrhu kompatibilnosti dijagnostičkih sistema bez obzira na proizvođača vozila. Faza tri počela je da se primenjuje od 2013. godine, uvođenjem Euro VI norme i zaoštravanjem graničnih vrednosti izduvne emisije, koja su obuhvatila i nove postupke ispitivanja i sertifikacija u cilju odobrenja tipa vozila, zatim kontrole ispravnosti i ekološkog nadzora i dr. (Posada and Bandivadekar, 2015; Miller et. al., 2024). Kontinuirana zaoštravanja graničnih vrednosti emisije izduvnih gasova, u skladu sa globalnim ciljevima

dekarbonizacije transportnog sektora, uvode novi koncept treće generacije dijagnostičkih sistema sa naglaskom na nadzor i praćenje u realnom vremenu. Treća generacija dijagnostičkih sistema još uvek nije uvedena ali neke osobine i funkcionalnosti se uvode kroz zakonodavne propise i regulative, poput sistema za praćenje u realnom vremenu emisije CO_2 i potrošnje goriva i formi izveštaja. Obavezna primena treće generacije dijagnostičkih sistema predviđena je u okviru Euro VII norme (Rexeis, 2021; Schäffer, 2021; Miller et. al., 2024).

Osnovne razlike između dijagnostičkih sistema na tržištu Evropske unije, Sjedinjenih Američkih Država ili Kine su u obimu informacija koje se razmenjuju, a koje proističu iz različitih regulatornih zahteva i standarda koji važe na različitim tržištima (Posada and Bandivadekar, 2015; Schäffer, 2021; Miller et. al., 2024). Protokoli kod vozila predstavljaju osnovu za razmenu podataka između EUJ na vozilu i prenosnog dijagnostičkog uređaja, čime omogućavaju uvid u radne parametre motora i sistema na vozilu. Veza između EUJ i dijagnostičkog uređaja, ostvaruje se putem odgovarajućeg komunikacijskog konektora. Oblik i lokacija dijagnostičkog konektora kod teretnih vozila u zavisnosti je od proizvođača vozila, godine proizvodnje vozila, komunikacijskih protokola i definisanih standarda i dr. U skladu sa navedenim, u nastavku teksta opisani su dijagnostički konektori kod teških teretnih vozila, koji su najučestaliji na tržištima Sjedinjenih Američkih Država, Evropske unije i Republike Srbije.

Dijagnostički šestopinski konektor prikazan na Slici 16 (a i b), namenjen je za razmenu podataka između EUJ i dijagnostičkih uređaja kod teških teretnih vozila i radnih mašina, putem komunikacijskih protokola SAE J1708 i SAE J1587. Primenjivao se prvenstveno na tržištu Sjedinjenih Američkih Država ali u drugim delovima sveta do 2000. godine, kada je postepeno zamenjen konektorom koji podržava protokol SAE J1939, prikazan na Slici 16 (b). Uvođenjem novog komunikacijskog protokola postavljeni su temelji za dalji razvoj razmene podataka između EUJ i dijagnostičkih uređaja kod teških teretnih vozila (Stepper, Butler and Zhu, 1995; Schäffer, 2021).



Slika 16. Izgled dijagnostičkih konektora SAE J1708 (a) i SAE J1939 (b) *(Izvor: Schäffer, 2021)*

U slučaju dijagnostičkog OBD II konektora, oblik i lokacija definisani su standardima (ISO 15031, SAE J1962). Prisutna su dva tipa konektora, tip A koji se ugrađuje u putnička i laka teretna vozila, i tip B koji se ugrađuje u teška teretna vozila, pomenuti konektori prikazani su na Slici 17. Konektori tip A Slika 17 (a) i konektor tip B Slika 17 (b) poseduju određene vizuelne sličnosti, tj. oba konektora su šesnaestopinska, dok se osnovne razlike ogledaju u napajanju i prisustvu srednjeg mosta (koji je kod tipa B podeljen na dva dela) i radnim naponima. Konektor tip A za napajanje koristi napon od 12 V, a konektor tip B napon od 24 V. Bitno je napomenuti da neki proizvođači teretnih vozila, pored standardnih komunikacijskih protokola i dijagnostičkih konektora definisanih standardima međunarodne organizacije za standardizaciju ISO *(engl. International Organization for Standardization)* i organizacije koja razvija tehničke standarde u automobilskoj industriji–udruženju automobilskih inženjera SAE

(engl. Society of Automotive Engineers), koriste i svoje vlastite protokole kao i namenske dijagnostičke uređaje, koji su dopunjeni sopstvenim softverskim rešenjima. Drugim rečima, svaki protokol definiše tehničke parametre prenosa podataka, kao što su naponski nivoi, struktura poruka i broj bitova, fizičke karakteristike prenosa i dr. Određene funkcije pinova su standardizovane i obavezne za sve proizvođače vozila, poput protokola SAE J1850, ISO 15765, ISO 14230, napajanja i dr., dok su druge funkcije dostupne za korišćenje u skladu sa specifičnim softverskim rešenjima proizvođača. Najčešće su rešenja zasnovana na proširenjima postojećih dijagnostičkih parametara koji potiču od specifičnih sistema na vozilu (statusi modula, nepravilnosti rada motora, statusa EGR sistema, SCR sistema i dr.) (Stepper, Butler and Zhu, 1995; Schäffer, 2021; Miller et. al., 2024).



Slika 17. Izgled dijagnostičkih konektora OBD II tip A (a) i OBD II tip B (b) *(Izvor: https://www.obd2-shop.eu/)*

Efikasnost dijagnostičkog uređaja zavisi od njegove kompatibilnosti sa proizvođačem vozila, vrstom i tipom vozila, zatim dostupnosti odgovarajućih komunikacijskih protokola, kao i softverske podrške i baze podataka. Trenutno na tržištu postoji više desetina tipova dijagnostičkih uređaja namenjenih za identifikaciju nepravilnosti u radu, praćenje i provere usklađenosti graničnih vrednosti emisije izduvnih gasova, radnih parametara motora, sistema na vozilu i dr. (Schäffer, 2021). Shodno tome, uređaje možemo podeliti na univerzalne dijagnostičke uređaje, koji podržavaju standardizovane komunikacijske protokole (poput SAE J1939, SAE J1850, ISO 15765, ISO 14230 i dr.) i koje je moguće primeniti kod više proizvođača vozila, i na namenske dijagnostičke uređaje, koji su namenjeni isključivo određenom proizvođaču vozila. Princip rada kod oba tipa uređaja zasnovan je na razmeni podataka sa vozilom putem odgovarajućeg komunikacijskog protokola i dijagnostičkog konektora (devetopinskog, šesnaestopinskog ili u nekim slučajevima kombinaciji navedenih). Kako je ranije navedeno, u slučaju prenosivih uređaja PEMS i dijagnostičkih uređaja, aktuelna istraživanja na temu izduvne emisije i potrošnje pogonskih goriva doprinose ubrzanom razvoju i prenosnih dijagnostičkih uređaja (Hallsten, 2009; Weller et. al., 2019; Mrđa, 2020; Pavlovic et. al., 2021; Ziółkowski et. al., 2022). Kao rezultat toga, na tržištu su prisutni razni modeli prenosnih dijagnostičkih uređaja koji imaju mogućnosti nadzora i praćenja podataka u realnom vremenu. Njihova izvođenja mogu biti klasičnog dizajna koji fizičkim putem ostvaruje vezu sa vozilima, do mogućnosti primene bezične komunikacije (Wi–Fi ili Bluetooth) putem odgovarajućeg adaptera, pametnih telefona ili prenosnih računara (Schäffer, 2021; Pavlovic et. al., 2021; Ziółkowski et. al., 2022).

Podaci koji se mogu očitati sa EUJ vozila, primenom dijagnostičkog uređaja su: status sistema, nepravilnosti u radu, kodovi grešaka i mogućnosti brisanja istih, zatim očitavanja u realnom vremenu sa davača na vozilu, poput parametra rada motora (broj obrtaja kolenastog vratila, opterećenje motora, temperatura rashladne tečnosti, količina i pritisak usisanog vazduha, temperatura usisanog vazduha, pritisak goriva u glavnoj magistrali, ciklusna ubrizgana količina goriva, vreme ubrizgavanja goriva i dr.). Takođe, moguće je očitavati trenutnu brzinu vozila,

ambijentalnu temperaturu, pređeni put, kao i podatke sistema za naknadni tretman gasova, podatke sa lambda sonde, status SCR sistema, status uree, napon akumulatorske baterije i dr. U narednom odeljku rada razmatrane su metode merenja pređene udaljenosti vozila.

3.3.3 Metode merenja pređene udaljenosti

U zavisnosti od početnih zahteva i neposrednog cilja istraživanja, kao i kod merenja potrošnje goriva, merenje pređene udaljenosti moguće je sprovoditi u laboratorijskim uslovima primenom šasijskih dinamometara ili putnim merenjima, primenom navigacionih uređaja. Metode merenja se prvenstveno razlikuju u primenjenoj opitnoj instalaciji, mernim uređajima, načinu obrade rezultata i dr.

Analizom dosadašnjih istraživanja (Borenstein and Feng, 1996; Weller et. al., 2019; Pavlovic et. al., 2021; Ziółkowski et. al., 2022; Shu et. al., 2022; Kuchar et. al., 2022; Fazekas and Gáspár, 2024), metode merenja pređene udaljenosti zasnivaju se na primeni navigacionih uređaja i satelitske navigacije, kao i metodama odometrijskih merenja. Navedene metode razlikuju se u načinu prikupljanja i obrade podataka. Metode zasnovane na primeni satelitske navigacije omogućavaju određivanje pređene udaljenosti na osnovu informacija o geografskom položaju vozila, izračunatih na osnovu podataka dobijenih od prijemnika (prenosnog uređaja na vozilu) i satelita. Nasuprot tome, metode odometrijskih merenja zasnivaju se na razmeni podataka sa senzora, koji se mogu nalaziti u točkovima vozila ili na zasebnom mernom uređaju (primena petog točka) i prenosnog uređaja, koji prati i prikuplja podatke o pređenoj udaljenosti. Metode zasnovane na primeni satelitske navigacije i odometrijskim merenjima primenjuju se prilikom ispitivanja emisije izduvnih gasova, potrošnje goriva ili provere tačnosti podataka očitanih sa OBD sistema i dr. Opis, princip rada navedenih metoda dat je u Tabeli 18.

Tabela 18. Metode za merenje pređene udaljenosti

Naziv metode	Tip uređaja/oprema	Opis
Metoda zasnovana na primeni satelitske navigacije	Uređaj na vozilu / Prenosni uređaj. Oprema uključuje navigacioni uređaj za očitavanje podataka o trenutnoj poziciji vozila i pređenoj udaljenosti, i softver za obradu podataka.	Metoda zasnovana na primeni satelitske navigacije zasniva se na razmeni signala između uređaja u vozilu sa dva ili više satelita u orbiti. Uređaji mogu biti sastavni deo vozila ili zasebni prenosni uređaji, čija je osnovna funkcija izračunavanje pređene udaljenosti na osnovu vremena koje protekne od slanja signala sa satelita do prijema. Pređena udaljenost se određuje na osnovu poznatih ulaznih podataka o poziciji vozila i udaljenosti satelita. Za normalne uslove rada, horizontalna tačnost merenja iznosi oko 3m, dok je vertikalna tačnost oko 5m, sa pouzdanosti od oko 95%[1*]. Primenjuje se u postupcima homologacionih, verifikacionih i eksploatacionih ispitivanja, kao i prema specifičnim zahtevima istraživanja. Kao prednost primene metode navodi se da nije potrebna prethodna priprema vozila za ispitivanje, kao i lako rukovanje. S druge strane, kao ograničenja navodi se da metoda nije pogodna za merenje manjih udaljenosti, kao i ometanje signala u tunelima i ruralnim predelima i dr. Takođe, tačnost metode u zavisnosti od kalibracije primenjenog uređaja, sprovedene od strane proizvođača vozila ili uređaja [1, 2].
Metoda odometrijskog merenja	Uređaj na vozilu / Prenosni uređaj. Oprema uključuje uređaj za očitavanje podataka o pređenoj udaljenosti i softver za obradu podataka.	Metoda odometrijskog merenja koristi se za merenje pređene udaljenosti na osnovu podataka o broju obrtaja točka, preuzetih sa senzora pozicioniranih u točkovima vozila ili opitne instalacije petog točka. Na osnovu podataka o dinamičkom poluprečniku točka, broju obrtaja i vremenskim intervalima uzorkovanja, moguće je odrediti pređenu udaljenost vozila [3]. Tačnost metode u zavisnosti je od dosta faktora, tipa uređaja, merne nesigurnosti senzora, kalibracije uređaja ili merne instalacije i dr. U slučaju da se pređena udaljenost određuje na osnovu izmerenih vrednosti dobijenih sa senzora, pozicioniranih u točkovima vozila, merna nesigurnost iznosi oko ±3%. Ukoliko se merenje vrši primenom petog točka, merna nesigurnost iznosi oko ±1% [3, 4]. Vrednosti pređene udaljenosti utvrđene metodom, često se koriste kao referentne za poređenja sa vrednostima očitanim na odometru vozila, tj. sa vrednostima očitanim sa EUJ vozila [3, 4]. Maksimalna dozvoljena odstupanja između izmerenih vrednosti pređene udaljenosti (utvrđene tokom ispitivanja vozila u skladu sa zakonskim regulativama i testovima) i

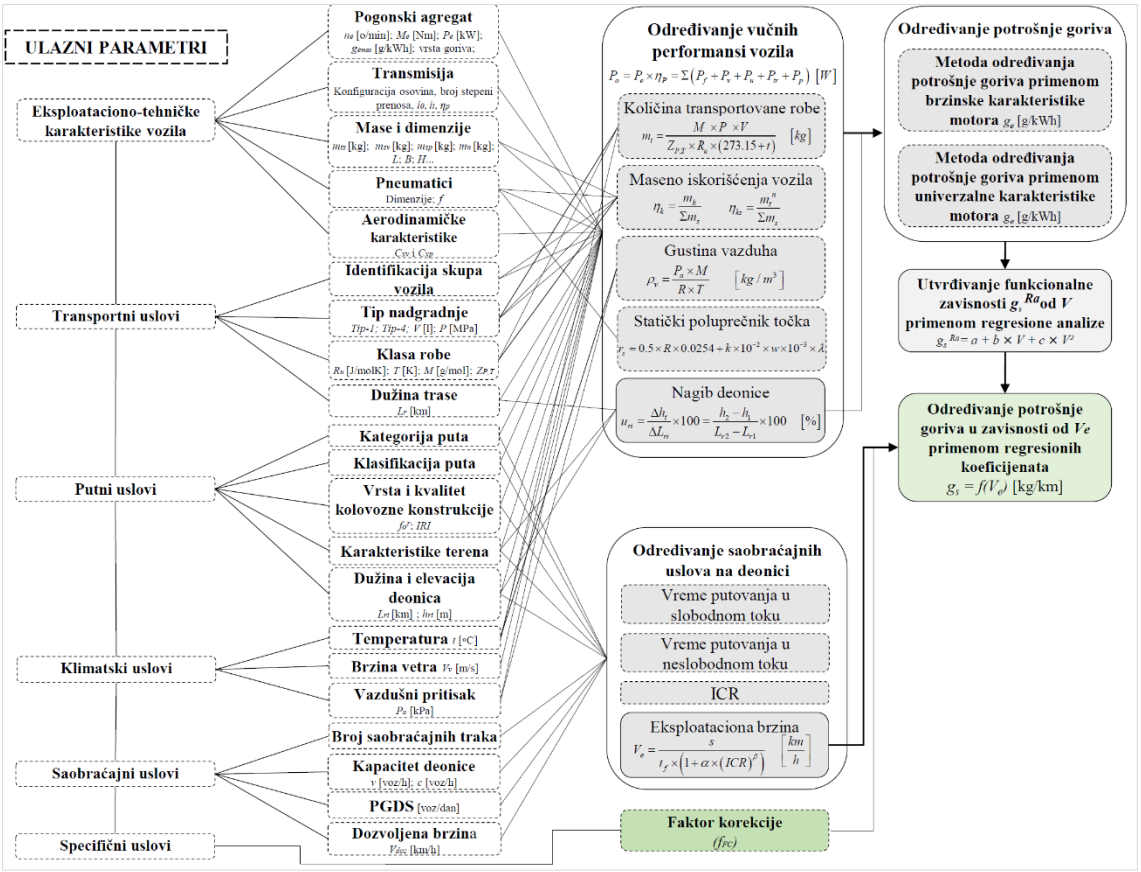
		očitanih vrednosti sa odomera na vozilu, do ±4% [4]. Primenjuje se u postupcima homologacionih, verifikacionih i eksploatacionih ispitivanja, kao i prema specifičnim zahtevima istraživanja. Prednosti metode su visoka tačnost, jednostavna priprema i relativno dostupna merna oprema i instalacija (u zavisnosti od primenjenog postupka). Takođe, metoda je pogodna za merenje kraćih udaljenosti. Kao osnovna ograničenja navode se fizička oštećenja koja mogu prouzrokovati greške merenja (kod primene petog točka), zatim greške koje mogu uslediti nakon promene pneumatika i pritiska u pneumaticima, priklizavanja točkova i dr.
Izvori: [1] U.S. Department of Defense, 2020. Global Positioning System Standard Positioning Service performance standard (5th ed.); [2] European Commission, 2021. Regulation (582/2011/EC) of the European Parliament and of the Council; [3] Kuchar et. al., 2022. The Accuracy Assessment of Devices Used for Distance Measuring in Dynamic Vehicle Tests; [4] United Nations Economic Commission for Europe. (2025). UN Regulation No. 39: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the speedometer and odometer equipment including its installation.		

U skladu sa prethodnim, u zavisnosti od zahtevane tačnosti rezultata, sve prisutnija metoda za određivanje pređene udaljenosti u postupcima eksploatacionih ispitivanja je primena podataka očitanih sa EUJ vozila. Osnovni razlog sve učestalije primene podataka pređene udaljenosti sa EUJ vozila su zakonske regulative koje definišu maksimalna dozvoljena odstupanja izmerenih vrednosti.

4. Model procene potrošnje goriva

4.1 Opis modela

U ovom poglavlju opisan je model za procenu potrošnje goriva kod teretnih vozila, sa posebnim akcentom na skupove vozila (sastave vučnih i priključnih vozila), obuhvatajući brojne faktore koji utiču na prosečnu potrošnju goriva. Model prikazan na Slici 18. predstavlja sveobuhvatan pristup proceni potrošnje goriva, uzimajući u obzir uticaje koji potiču od: eksploatacione–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, transportnih, putnih, klimatskih, saobraćajnih i specifičnih uslova eksploatacije.



Slika 18. Model procene potrošnje goriva *(Vašalić i ostali, 2025)*

Postupak procene potrošnje goriva na određenoj trasi ili njenim deonicama odvija se kroz nekoliko faza. Prva faza modela uključuje definisanje ulaznih parametara, koji su ključni za dalju analizu. Tačnost izlaznih rezultata procene modela u direktnoj je zavisnosti od kvaliteta ulaznih podataka. Ulazni parametri eksploatacione–tehničke karakteristika vozila i nadgradnji obuhvataju podatke o pogonskom agregatu, transmisiji, masama i dimenzijama, kao i podatke o pneumaticima i aerodinamičkim karakteristikama. Transportni uslovi uključuju podatke o teretnim vozilima (sastavima vučnih i priključnih vozila), načinu skladištenja i transporta robe (tipu nadgradnje, tj. cisternama, svežnjevma posuda, baterijskim vozilima ili MEGC nadgradnjma, tehničkim karakteristikama posuda i dr.), klasi robe (agregatnom stanju robe, hemijskim karakteristikama i UN klasi) i dužini trase transporta. Putni uslovi uključuju podatke o kategoriji i funkcionalnoj klasifikaciju puta (auto–put, magistralni, regionalni, lokalni i nekategorisani put), vrsti kolovozne konstrukcije (asfaltirani put, betonski put, makadam,

zemljani put), kvalitetu puta (prisutnost neravnina), karakteristikama (tip) terena (ravničarski, brdski i planinski), kao i broju, dužini i elevaciji deonica. Uticaj klimatskih uslova na potrošnju goriva opisan je parametrima koji odgovaraju regionalnoj oblasti na kojoj se deonica trase nalazi, tj. prosečnim vrednostima: temperature, brzine i pravca vetra, kao i vazdušnog pritiska (navedeni parametri utiču na transportovane količine robe i performanse vozila, tj. na otpore kretanju i potrošnju goriva). Saobraćajni uslovi uključuju podatke o broju saobraćajnih traka, kapacitetu puta (deonica), prosečnom godišnjem dnevnom saobraćaju *(PGDS)* i dozvoljenoj brzini kretanja na deonicama trase (V_d). S druge strane, složeni režim kretanja vozila u saobraćajnom toku predstavljen je prosečnom eksploatacionom brzinom vozila (V_e) na trasi, odnosno njenim deonicama. Parametri poput broja saobraćajnih traka, kapaciteta deonice i *PGDS* direktno utiču na tok saobraćaja i saobraćajno opterećenje, što se odražava na vreme putovanja u neslobodnom toku. Eksploataciona brzina zavisi od vremena putovanja u neslobodnom toku, indikatora saobraćajnog opterećenja, dužine deonice, kao i odnosa saobraćajnog toka i kapaciteta deonice. Postupak određivanja eksploatacione brzine vozila na trasi, odnosno njenim deonicama, opisan je u narednom odeljku rada. Specifični uslovi eksploatacije predstavljeni su dodatnim faktorima korekcije potrošnje goriva kojima su obuhvaćeni međusobni uticaji vozila u saobraćajnom toku, način upravljanja vozilom, učestalost zaustavljanja–vožnja u naseljenom mestu ili vožnja na otvorenom putu i dr.

Nakon definisanja ulaznih parametara, u sledećoj fazi modela prelazi se na određivanje vučnih performansi vozila. Analogno vučnom bilansu, ova faza uključuje uravnoteženje dovedene snage na pogonske točkove sa snagom potrebnom za savladavanje otpora kretanja za ravnomerni režim kretanja. Na osnovu vučnih performansi vozila, koje predstavljaju zavisnost ulaznih parametara koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, transportnih, putnih i klimatskih uslova eksploatacije, utvrđuje se zavisnost specifične efektivne potrošnje goriva od brzine kretanja u pojedinim stepenima prenosa. Zavisnost specifične efektivne potrošnje goriva od brzine kretanja izražene u gramima po kilovat–satu, moguće je utvrditi primenom jednom od metoda za određivanje potrošnje goriva ili primenom softverskih rešenja.

Treća faza modela obuhvata uticaje koju proističu iz saobraćajnih uslova na trasi, odnosno na njenim deonicama. Ova analiza obuhvata određivanje vremena putovanja u slobodnom i neslobodnom toku, gde neslobodan tok može značajno povećati potrošnju goriva zbog raznih faktora, a pre svega, međusobnog uticaja vozila u saobraćajnom toku. Indeks saobraćajnog opterećenja *(ICR)* koristi se za kvantifikaciju opterećenosti puta (saobraćajnice), dok prosečna eksploataciona brzina predstavlja ključni parametar na osnovu koga se, primenom parametara regresije, određuje prosečna potrošnja goriva za svaku deoncu. Poslednja faza modela predstavlja najvažniji deo analize. Naime, prosečna specifična potrošnja goriva na svakoj deonici, izražena u kilogramima sagorelog goriva po kilometru pređenog puta, izračunava na osnovu prethodno određenih vučnih performansi vozila i utvrđene specifične efektivne potrošnje goriva za date karakteristike pogonskog agregata. U poslednjem koraku modela, primenom regresione analize i korektivnih faktora, eksploataciono–tehničke karakteristike vozila, transportni, putni i klimatski uslovi povezuju se sa saobraćajnim i specifičnim uslovima eksploatacije. Regresionom analizom utvrđena je funkcionalna zavisnost specifične potrošnje goriva od eksploatacione brzine vozila na svakoj deonici trase, dok su uticaji saobraćajnih i specifičnih uslova eksploatacije na povećanje potrošnje goriva obuhvaćeni su korekcionim faktorima.

Ključne razlike modela predstavljenog u ovom radu u odnosu na prethodna istraživanja, data u Poglavlju 2, i ogledaju se kroz specifičnosti koje prate vozila i nadgradnje namenjene za transport komprimovanih gasova, poput tehničkih ograničenja i zavisnosti od radnih uslova

(pritiska i temperature) na masu komprimovanog gasa i potrošnju goriva. Važno je istaći da razvijeni model odlikuje fleksibilnost, odnosno mogućnost prilagođavanja i primena na ostale kategorije vozila i vrste ugljovodoničnih goriva. Jedan od primarnih ciljeva modela, odnosno rada u celini, jeste analiza direktnih efekata primene vozila i nadgradnji namenjenih za transport gasova, zasnovana na utvrđivanju relevantnih parametara za dalje analize. Posebna pažnja posvećena je parametrima potrošnje goriva u zavisnosti od tipa nadgradnje, vrste pogonskog goriva, količine transportovanog gasa i masenog iskorišćenja vozila. Drugim rečima parametara koji mogu doprineti odlukama prilikom izbora novih vozila ili konverziji postojećih, posebno u kontekstu prelaska na alternativne pogonske energente–goriva ili konverziju nadgradnji, tj. prelazak i primenu nadgradnji koje su izrađene od lakših materijala.

4.2 Definisanje transportnih zahteva

4.2.1 Podaci o uslovima eksploatacije

Uslovi eksploatacije predstavljaju skup specifičnih faktora i okolnosti u kojima se vozilo koristi, a koji direktno utiču na njegovu efikasnost, pouzdanost, performanse, projektovani vek upotrebe, potrošnju goriva, emisiju izduvnih gasova i dr. Eksploatacioni uslovi definišu okruženje i način rada vozila, uključuju različite parametre koji ih opisuju, a koji se načelno mogu podeliti u nekoliko osnovnih grupa: transportni, putni, klimatski, saobraćajni i specifični. Shodno navedenom, uslovi eksploatacije pružaju okvir za ocenu efikasnosti ali i optimizaciju performansi vozila u realnim uslovima vožnje. U tom smislu, značaj i pravilno definisanje eksploatacionih uslova, tj. ulaznih parametara koji ih u određenoj meri opisuju, ključni su za procenu potrošnje goriva.

U Tabeli 19. navedeni su parametri, koji su korišćeni za potrebe funkcionisanja modela razvijenih u radu, a sa kojima su obuhvaćeni uticaji uslova eksploatacije vozila na potrošnju goriva, emisiju izduvnih gasova, transportovane količine robe, potrošnju goriva i masena iskorišćenja vozila. Takođe, u tabeli su navedeni nazivi parametara, njihovi opisi i izvori podataka o njihovim vrednostima.

Tabela 19. Dodeljeni parametri koji opisuju uslove eksploatacije

Rb.	Oznaka	Jedinica	Opis	Izvor podataka
1.	*i*	[-]	Identifikacija skupa vozila. Zahtevi koji se odnose na vozila kategorije N i O, njihove konstrukcije, odobrenja tipa vozila i oznake prema delu 9 Sporazuma (EXII, EXIII, FL, AT i MEMU).	Nacionalna baza podataka. Sporazum o međunarodnom drumskom transportu opasne robe.[1]
2.	*n*	[-]	Identifikacija tipa nadgradnje. Zahtevi koji su u zavisnosti od oznake vozila i fizičko–hemijskih svojstava materije (čvrsto, tečno ili gasovito) koja se skladišti–transportuje, kao i od tipa vozila i nadgradnje (cisterne, baterijska vozila, MEGC, svežnjevi posuda–boca, itd.)	Nacionalna baza podataka. Sporazum o međunarodnom drumskom transportu opasne robe.[1]
3.	*UN*	[-]	Vrsta i klasifikacija opasne materije (robe). U zavisnosti od fizičkih svojstava (čvrste, tečne ili gasovite) i hemijskih osobina (zapaljive, korozivne, otrovne itd.), razvrstavaju se prema UN klasifikaciji i Sporazumu u devet klasa.	Sporazum o međunarodnom drumskom transportu opasne robe.[1]
4.	L_r	[m]	Ukupna dužina trase predstavlja udaljenost između između početne (mesta utovara) i krajnje tačke (mesta istovara robe).	Nacionalna baza podataka i primena aplikacije S Projekt – GIS Portal.[2]
5.	*KP*	[-]	Kategorija puta. Podela prema značaju, tehničkim karakteristikama, saobraćajnim ograničenjima i nameni. Putevi se dele na državne puteve I i II reda, opštinske puteve i ulice.	Nacionalna baza podataka.[2]

6.	*FK*	[-]	Funkcionalna klasifikacija puta. U okviru funkcionalne klasifikacije, razlikuju se auto–putevi (AP), magistralni (MP), regionalni (RP), lokalni (LP) i nekategorisani putevi (NP).	Nacionalna baza podataka.[2]
7.	f_o	[-]	Koeficijent otpora kotrljanju. U zavisnosti od vrste kolovozne konstrukcije (fleksibilne–asfaltne, krute–betonske, makadamske i zemljane), definiše se vrednost koeficijenta otpora kotrljanju na trasi, odnosno deonicama trase.	Nacionalna baza podataka i primena aplikacije S Projekt – GIS Portal. Robert Bosch, Automotive Handbook.[2,3]
8.	*IRI*	[m/km]	Kvalitet puta–kolovozne konstrukcije. Međunarodni indeks hrapavosti *(IRI)* indikator vertikalne oscilacije vozila po jedinici pređene dužine (prisutnost neravnina). (< 1,5 – izuzetno dobar; 1,5 do 3,0 – dobar; 3,0 do 5,0 – srednji; > 5,0 – loš kvalitet puta).	Nacionalna baza podataka Izveštaj Br. 48620-YF.[4]
9.	L_{ri}	[m]	Dužina i broj deonica trase.	Primena aplikacije S Projekt – GIS Portal.[2]
10.	*KT*	[-]	Karakteristike (tip) terena. U zavisnosti od regiona u kojem se deonica nalazi, podeljene u tri grupe: ravničarske – 1, brdske – 2 ili planinske – 3.	Primena aplikacije S Projekt – GIS Portal.[2]
11.	h_{ri}	[m]	Elevacija deonice. Zavisi od karakteristika (tipa) terena.	Primena aplikacije S Projekt – GIS Portal.[2]
12.	*t*	[°C]	Srednja vrednost temperature vazduha u regionalnoj oblasti (okrugu) na kojoj se deonica nalazi.	Nacionalna baza podataka RHMZ.[5]
13.	V_v	[m/s]	Srednja vrednost brzine vetra u regionalnoj oblasti (okrugu) na kojoj se deonica nalazi.	Nacionalna baza podataka RHMZ.[5]
14.	P_a	[kPa]	Srednja vrednost atmosferskog pritiska u regionalnoj oblasti (okrugu) na kojoj se deonica nalazi.	Nacionalna baza podataka RHMZ.[5]
15.	*BT*	[-]	Broj saobraćajnih traka u odlasku – 1 ili – 2 Broj saobraćajnih traka u povratku – 1 ili – 2	Nacionalna baza podataka i primena aplikacije S Projekt – GIS Portal.[2]
16.	*c*	[voz/h]	Časovni kapacitet po traci u odlasku i povratku.	Nacionalna baza podataka.[2]
17.	*PGDS*	[voz/dan]	Prosečan godišnji dnevni saobraćaj. Ukupan broj vozila dnevno za oba smera (putničkih, autobusa, lakih teretnih, srednje teretnih, teških teretnih, skupova vozila).	Nacionalna baza podataka i ekspertska ocena za deonice za koje nema informacija o brojanju.[2, 3]
18.	V_d	[km/h]	Dozvoljena brzina na deonicama trase. Pravna regulativa koju postavljaju saobraćajni propisi.	Određena saobraćajnim znakom.

Izvor:
[1] Međunarodni sporazum o drumskom transportu opasne robe, izdanje 2023 i 2025 (ECE/326 i 352). https://www.mgsi.gov.rs/;
[2] Javno preduzeće putevi Srbije, GIS portal. https://www.putevi-srbije.rs/index.php/referentni-sistem;
[3] Robert Bosch GmbH, 2022. Automotive Handbook;
[4] World Bank, 2009. Serbia: Confronting the fiscal crisis through increased public sector productivity. https://openknowledge.worldbank.org/;
[5] RHMZ - Republički Hidrometeorološki zavod Srbije. https://www.hidmet.gov.rs.

4.2.1.1 Količina transportovane robe

Količina transportovane robe u zavisnosti je od različitih faktora, uključujući tehničke karakteristike vozila i posuda, kao i fizičko–hemijskih osobina same robe (gasa) koja se transportuje. Kod transporta tečnosti i gasova, količina robe izražava se u zapreminskim (litri, kubni metri) ili masenim jedinicama (kilogrami, tone). Za potrebe funkcionisanja modela, za proračun količine transportovanog gasa po jednoj vožnji primenjen je izraz [1.1] (Bogner i Isailović, 2016), koji opisuje zavisnost mase komprimovanog gasa od njegovih fizičko–hemijskih karakteristika (molarne mase) i ključnih parametara poput radnog pritiska, zapremine, temperature i faktora kompresibilnosti. Navedene zavisnosti detaljno su objašnjene u Poglavlju 6, tj. modelu procene transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta.

$$m_{t,n} = \frac{M \times P_n \times V_n}{Z_{P,T} \times R_u \times (273{,}15 + t)} \quad [kg] \qquad [1.1]$$

gde su: $m_{t,n}$ – količina transportovanog gasa [kg], P_n – radni pritisak posude [MPa] i V_n – zapremina [dm³] predstavljaju zavisnost od tipa posuda *n*, *t* – temperatura [°C], *M* – molarna masa [g/mol], R_u – univerzalna gasna konstanta [J/molK], i $Z_{P,T}$ – faktor kompresibilnosti (u zavisnosti od pritiska i temperature, detaljno opisano u Poglavlju 6 i navedeno u prilogu rada (Prilog 3, Tabela P3.1)).

4.2.1.2 Maseno iskorišćenje vozila

Ocena efikasnosti teretnih vozila, sastava vučnih i priključnih vozila, prikazana je koeficijentima iskorišćenja masa vozila η_k i η_{ks}. Koeficijent η_k prikazan izrazom [1.2] (Topenčarević, 1987; Krstić, 2009; Ivković, 2017), definiše se kao odnos korisne nosivosti vozila m_k i ukupne mase vozila spremnih za vožnju (Σm_s), gde je Σm_s zbir masa vučnog i priključnog vozila.

$$\eta_k = \frac{m_k}{m_{sv} + m_{sp}} = \frac{m_k}{\Sigma m_s} \qquad [1.2]$$

Prilikom transporta opasne robe u tečnom ili gasovitom stanju, specifični uticaji – kao što su tehničke karakteristike posuda, radni pritisci, zapremine, materijali izrade, fizičko–hemijske osobine robe i zakonska ograničenja – značajno utiču na iskorišćenje mase vozila. Stoga je uveden koeficijent iskorišćenja η_{ks}, kako bi se realno prikazala efikasnost vozila i nadgradnji u ovim specifičnim uslovma. Koeficijent η_{ks} definisan izrazom [1.3] (Vašalić, Ivković, Mladenović, Sekulić, Miličević i Suljovrujić, 2024; Vašalić, Ivković, Kaplanović, Miličević, Mladenović, Sekulić i Suljovrujić, 2025), predstavlja odnos transportovane mase robe $m_{t,n}$ i ukupne mase vozila spremnih za vožnju Σm_s.

$$\eta_{ks} = \frac{m_{t,n}}{m_{sv} + m_{sp}} = \frac{m_{t,n}}{\Sigma m_s} \qquad [1.3]$$

gde su: $m_{t,n}$ – transportovana masa gasa [kg], m_{sv} – masa vučnog vozila spremnog za vožnju [kg], m_{sp} – masa priključnog vozila spremnog za vožnju [kg].

4.2.1.3 Gustina vazduha

Izvori podatka o klimatskim uslovima za teritoriju Republike Srbije predstavljeni su u Meteorološkim godišnjacima i Operativnim hidrometeorološkim mesečnim biltenima, koje izdaje Republički hidrometeorološki zavod Republike Srbije (RHMZ). Parametri koji opisuju klimatske uslove, a potrebni su za funkcionisanje modela, uključuju: *t* – srednju mesečnu temperaturu [°C], V_v – srednju brzinu vetra [m/s], P_a – srednju vrednost vazdušnog pritiska [kPa]. Vrednosti gustine vazduha ρ_v za potrebe funkcionisanja modela, određene su primenom jednačine stanja idealnog gasa [1.4] (Đorđević, Valent i Šerbanović, 2005; Bogner i Isailović, 2016).

$$\rho_v = \frac{P_a \times M}{R_u \times T} \qquad \left[kg / m^3 \right] \qquad [1.4]$$

gde su: T – srednja mesečna temperatura [K] i P_a – srednja vrednost vazdušnog pritiska, odgovarara za regionalnu oblast (okrug) gde se deonica nalazi [kPa], R_u – univerzalna gasna konstanta [J/molK], M – molarna masa vazduha [kg/mol] i ρ_v – gustina vazduha [kg/m³]. Za potrebe funkcionisanja modela, usvojena je vrednost molarne mase za suvi vazduh (M = *0,028964* [kg/mol]).

4.2.1.4 Eksploataciona brzina vozila

Teretna vozila tokom realnih uslova eksploatacije izložena su promenljivom režimu kretanja u kojem se tokom kratkog vremenskog perioda često smenjuju ubrzanja, usporenja, zaustavljanja i ponovna kretanja vozila. S tim u vezi, umesto izračunavanja kompletnog režima kretanja vozila, koji odgovara realnim uslovima vožnje, u tehničkim proračunima primenjuju se izračunavanja za određene karakteristične režime kretanja. Na ovaj način se složen proces kretanja vozila pojednostavljuje i sagledava kroz nekoliko režima kretanja, a koji u realnim uslovima eksploatacije predstavljaju faze ili međufaze režima kretanja. Budući da se dinamičnost vozila, kao jedno od osnovnih eksploataciono–tehničkih svojstava najviše zavisi do brzine kretanja vozila, može se izvesti zaključak da se ovo svojstvo može oceniti i vrednovati preko prosečne eksploatacione brzine koju vozilo može ostvariti u datim uslovima eksploatacije (Ivković, 2020; Ivković i ostali, 2017b; Vašalić i ostali, 2024, 2025). Međutim, analitičko izražavanje svih parametara koji potiču od uslova eksploatacije na prosečnu brzinu kretanja nije izvodljivo, pre svega zbog broja parametara, njihove promene po intenzitetu i pravcu delovanja tokom kretanja na trasi, odnosno deonicama trase. U skladu sa navedenim, za potrebe funkcionisanja modela prosečna eksploataciona brzina razmatranih skupova vozila određena je primenom BPR izraza [1.5] i [1.6] (US Bureau of Public Roads) (Ivković, 2012; Ivković i ostali, 2017b).

Izrazom [1.5] opisana je zavisnost vremena putovanja u neslobodnom toku u funkciji od vremena putovanja pri slobodnom toku, pri čemu uzima u obzir odnos saobraćajnog toka *(v)* i kapaciteta puta *(ICR),* kao i zavisnost od empirijskih parametra (α i β).

$$t_o = t_f \times \left(1+\alpha \times \left(\frac{v}{c}\right)^{\beta}\right) = t_f \times \left(1+\alpha \times \left(ICR\right)^{\beta}\right) \qquad [1.5]$$

Eksploataciona brzina vozila [1.6]:

$$V_e = \frac{s}{t_o} = \frac{s}{t_f \times \left(1+\alpha \times \left(\frac{v}{c}\right)^{\beta}\right)} = \frac{s}{t_f \times \left(1+\alpha \times \left(ICR\right)^{\beta}\right)} \quad \left[\frac{km}{h}\right] \qquad [1.6]$$

gde su: t_o – vreme putovanja neslobodnog toka [h], zavisi od t_f – vremena putovanja pri slobodnom toku [h], indikatora opterećenja saobraćajnice *ICR*, definisan kao odnos v – saobraćajni toka i c – kapaciteta puta (deonice), s – dužina deonice [km], α i β – empirijski parametri modela. Saobraćajni tok v predstavlja broj vozila koja prolaze određenom saobraćajnicom u jedinici vremena [voz/h], dok kapacitet puta c označava maksimaln broj vozila koji može proći određenom saobraćajnicom u jedinici vremena bez značajnog zastoja [voz/h]. Odnos *v/c* definiše stepen zasićenja, odnosno opterećenja puta (Kuzović, 1987; Kuzović i Topolnik, 1989). Zavisnost vremena putovanja od opterećenja puta utvrđena je

prarametrima α i β. Parametri α i β se empirijski određuju i zavise od klasifikacije puta, a njihove vrednosti i izvori podataka prikazane su u Tabeli 20.

Tabela 20. Vrednosti parametara α i β		
Klasifikacija puta	Parametar α	Parametar β
Auto–put	0,45	4,00
Dvotračni put	0,50	2,50
Lokalni put	0,80	1,50
Izvor: [1] Newton, S., 2009. Serbian National Transport Model System; [2] Ivković, 2012. Istraživanje performansi autobusa sa pogonom na komprimovani prirodni gas sa stanovišta bezbednosti i uticaja na životnu sredinu.		

4.2.1.5 Podaci o putnoj mreži i nagibu deonica

Transport opasne robe obavlja se svakodnevno na unapred utvrđenim trasama na celoj teritoriji Republike Srbije. Putna mreža Republike Srbije, prema kategorizacji i značaju saobraćajnog povezivanja, podeljena je na državne puteve I i II reda, opštinske puteve i ulice. U okviru državne putne mreže, putevi I reda dele se na puteve IA, IM i IB reda, dok se putevi II reda dele se na IIA i II B. S druge strane, prema funkcionalnoj klasifikaciji, putna mreža je podeljena na autoputeve, magistralne, regionalne, lokalne i nekategorisane puteve. Putevi kategorije I obuhvataju regionalne i međuregionalne saobraćajnice, dok putevi kategorije II obuhvataju saobraćajnice koje imaju regionalni i lokalni značaj (Putevi Srbije, 2025), dato u Prilogu 1. Razmatrana trasa odgovara mreži državnih puteva, obuhvatajući puteve IB i II reda, opštinske puteve i ulice. Za potrebe funkcionisanja modela, deonice trase definisane su kao rastojanja između dva saobraćajna čvora, pri čemu svaka deonica duž svoje trase ima homogene eksploataciono–tehničke parametre. Modelom su obuhvaćeni parametri, poput: kategorije puta, broja saobraćajnih traka, uzdužnih nagiba, stanja i vrste kolovozne konstrukcije, ograničenja brzine, kapaciteta puta, prosečnog vremna putovanja i dr (Vašalić i ostali, 2024).

Nagib deonice u_{ri} predstavlja procenat visinske promene u odnosu na pređenu horizontalnu udaljenost – promena elevacije u odnosu na pređenu dužinu puta. Vrednosti nagiba deonice u_{ri} definisane su odnosom promene visine Δh_i i promene dužine deonice ΔL_{ri}, prikazano formulom [1.7].

$$u_{ri} = \frac{\Delta h_i}{\Delta L_{ri}} \times 100 = \frac{h_2 - h_1}{L_{r2} - L_{r1}} \times 100 \qquad [\%] \qquad [1.7]$$

$\Delta h_i > 0 \rightarrow$ *nagib je pozitivan*

$\Delta h_i < 0 \rightarrow$ *nagib je negativan*

gde su: $\Delta h_i = h_2 - h_1$ razlika elevacije na početku i na kraju deonice [m]; $\Delta h_i > 0$, elevacija h_2 je veća od h_1, nagib pozitivan (uspon); $\Delta h_i < 0$, elevacija h_2 je manja od h_1, nagib negativan (pad); $\Delta L_{ri} = L_{r2} - L_{r1}$ horizontalna dužina deonice [m].

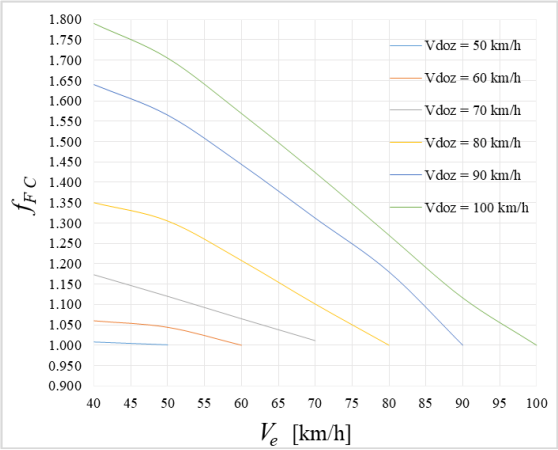
4.2.1.6 Korektivni faktor potrošnje goriva

Korektivnim faktorima predstavljeno je povećanje specifične potrošnje goriva pri prosečnoj eksploatacionoj brzini kretanja, prouzrokovano međusobnim uticajima vozila u

saobraćajnom toku, načinom upravljanja vozilom, učestalošću zaustavljanja – vožnjom u naseljenom mestu ili na otvorenom putu i dr. (Kuzović, 1994). Međusobni uticaji vozila u saobraćajnom toku predstavljaju dinamičke interakcije koje nastaju između vozila tokom kretanja u okviru toka, pri čemu njihove veličine i karakter u velikoj meri zavise od uslova eksploatacije vozila (obuhvatajući transportne, putne, klimatske, saobraćajne i specifične uslove) (TRB, 2000; TRB, 2022).

Uticaji transportnih, putnih i klimatskih uslova na veličine otpora kretanju i potrošnju goriva, utvrđeni su u prethodnim poglavljima i odeljcima rada. Kako bi se uočio uticaj saobraćajnih i specifičnih uslova na trasi, tj. na deonicama trase (dozvoljena brzina kretanja, prosečni godišnji dnevni saobraćaj, vreme putovanja u neslobodnom toku, vreme putovanja u slobodnom toku, odnos saobraćajnog toka i kapaciteta puta (deonice), dužina deonica, načinu upravljanja vozilom, stil vožnje, česta zaustavljanja i ponovna kretanja, vožnja na otvorenom putu i dr.) primenjeni su izrazi [1.5] , [1.6] i korektivni faktor potrošnje goriva.

Zavisnost korektivnog faktora potrošnje goriva f_{FC} od dozvoljene brzine kretanja vozila i prosečne eksploatacione brzine kretanja na trasi, odnosno na njenim deonicama, za teretna vozila prikazana je na Slici 19. Dijagram na apscisnoj osi sadrži eksploatacionu brzinu kretanja, a na ordinatnoj osi korektivni faktor potrošnje goriva. Konstrukcija dijagrama izvedena je na osnovu matrice korektivnih faktora dobijenih od prosečne neometane brzine i prosečne eksploatacione brzine (Kuzović, 1994). Prosečna neometana brzina predstavlja brzinu vozila u uslovima kada nema saobraćajnih smetnji, ograničenja ili drugih faktora koji utiču na kretanje vozila. Dozvoljena brzina kretanja na putevima na teritoriji Republike Srbije za teretna vozila, kao i za sastave vučnog i priključnog vozila, iznosi 70 km/h, osim na auto–putu gde je najveća dozvoljena brzina 90 km/h (ZoBS, 2023).



Slika 19 Korektivni faktor potrošnje goriva

4.2.2 Podaci o vozilima i nadgradnjama

Eksploataciono–tehničke karakteristike vozila predstavljaju skup parametara koji određuju tehničke performanse i radne osobine vozila u realnim uslovima eksploatacije. Ove karakteristike su ključne za analizu efikasnosti vozila i nadgradnji, ali i prilagodljivosti vozila različitim transportnim zadacima (Krstić, 2009). Uticajni parametri sa kojima su opisane eksploataciono–tehničke karakteristike razmatranih vozila i nadgradnji, navedeni su u Tabelama 21, 22 i 23. U Tabelama 21 i 22., navedeni su maseni i dimenzioni parametri analiziranih vučnih i priključnih vozila, njihovi opisi i izvori podataka. Navedene vrednosti u zavisnosti su od oblika karoserije i tipa nadgradnje *n*. Vrednost m_t predstavlja masu transportovanog gasa po jednoj vožnji i odgovara temperaturnim uslovima od 15 °C, što je detaljno objašnjeno u Poglavlju 6. Maseni i dimenzioni parametri određeni su na osnovu tehničke dokumentacije, dostupnih baza podataka proizvođača vozila i merenjem u realnim uslovima eksploatacije. Maseni parametri, poput mase vozila spremnog za vožnju, određeni su merenjem primenom mernih uređaja–vaga sa neautomatskim funkcionisanjem. Merni uređaji (merila mase) proizvođača DiniArgeo, omogućavaju određivanje ukupne mase vozila, mase

vozila spremnog za vožnju, kao i raspodele osovinskih opterećenja u opterećenom i neopterećenom stanju (Trzciński, Moskalik, and Wojtan, 2018). Koncepcija vučnih vozila (položaj ugradnje motora i transmisije) zasniva se na podužno postavljenom pogonskom agregatu i transmisionim elementima smeštenim napred, sa pogonom na zadnjoj osovini.

Tabela 21. Mase i dimenzije vučnih vozila

Oznaka oblika karoserije:	BC – tegljač	BC – tegljač	BC – tegljač	BA/08 – kamion
Mase vozila				
Najveća dozvoljena masa vozila [kg]:	20500	18000	20000	26000
Najveća dozvoljena masa sastava vozila m_{ts} [kg]:	41000	41000	41000	40000
Nadgradnja:	-	-	-	MEGC
Tip posuda – nadgradnje *n*:	-	-	-	Tip–1/ Tip–4
Zapremina posuda [dm^3]:	-	-	-	11700/18900
Radni pritisci posuda [MPa]:	-	-	-	200/250
Masa nadgradnje m_n [kg]:	-	-	-	11232/5076
Masa vozila spremnog za vožnju m_{sv} [kg]:	7530	7700	8119	20709/14553
Nosivost vozila m_k [kg]:	-	-	-	5291/11447
Masa gasa $m_{t,n}$ [kg]:	-	-	-	2011/3248
Masa prazne posude [kg]:	-	-	-	144/94
Dimenzije vozila				
Dužina vozila *L* [mm]:	6010	6025	6252	9811
Širina vozila *B* [mm]:	2550	2500	2550	2550
Visina vozila *H* [mm]:	4000	3450	3762	3848
Osovinska konfiguracija:	4x2	4x2	4x2	6x2
Pneumatici:				
Prva osovina:	315/70 R 22.5	315/70 R 22.5	315/70 R 22.5	315/80 R 22.5
Druga osovina:	315/70 R 22.5	315/70 R 22.5	315/70 R 22.5	315/80 R 22.5
Treća osovina:	-	-	-	315/80 R 22.5

Izvor:
[1]Tehnička dokumentacija, potvrda o saobraznosti – Certificate of conformity ("COC");
[2] DAF truck bodybuilding guidelines: https://www.dafbbi.com/en – technical specification;
[3] Mercedes-Benz truck bodybuilding instructions: https://bb-portal.mercedes-benz.com/- technical data – specification;
[4] IVECO truck bodybuilding instructions: https://newibb.iveco.com/en/Pages/Home.aspx – technical specification;

Tabela 22. Mase i dimenzije priključnih vozila

Oznaka oblika karoserije:	DA/SG/99	DA/08	DB/08	DB/08
	Poluprikolica	Poluprikolica	Prikolica	Prikolica
Nadgradnja:	Baterija	MEGC	MEGC	MEGC
Tip posuda – nadgradnje *n*:	Tip–1	Tip–4	Tip–1	Tip–4
Zapremina posuda [dm^3]:	22350	39000	11700	18900
Radni pritisci posuda [MPa]:	20	25	20	25
Mase vozila				
Najveća dozvoljena masa vozila [kg]:	39000	39000	18000	18000
Masa nadgradnje m_n [kg]:	24420	18310	11466	7786
Masa vozila spremnog za vožnju m_{sp} [kg]:	28340	22160	14166	10476
Nosivost vozila m_k [kg]:	10660	16840	3834	7524
Masa gasa m_t [kg]:	3841	8571	2011	3248
Masa prazne posude [kg]:	147	94	144	94
Dimenzije vozila				
Dužina vozila *L* [mm]:	13620	12435	9294	9093/9294
Širina vozila *B* [mm]:	2500	2485	2480	2480
Visina vozila *H* [mm]:	3653	3763	3243	3755
Broj osovina i točkova:	3/6	3/6	2/4	2/4
Pneumatici:				
Prva osovina:	385/65 R 22,5	385/65 R 22,5	385/65 R 22,5	385/65 R 22,5
Druga osovina:	385/65 R 22,5	385/65 R 22,5	385/65 R 22,5	385/65 R 22,5
Treća osovina:	385/65 R 22,5	385/65 R 22,5	-	-

Izvor:
[1]Tehnička dokumentacija, potvrda o saobraznosti – Certificate of conformity ("COC");
Oznake u saglasnosti sa Pravilnikom o podeli motornih i priključnih vozila i tehničkim uslovima za vozila u saobraćaju na putevima, 2025.
DA/SG/99 – poluprikolica/specijalno vozila/oznaka karoserije ne postoji u važećoj listi;
DA/08 – poluprikolica/nosač kontejnera;
DA/08 – prikolica/nosač kontejnera;

Eksploataciono–tehničke karakteristike pogonskih agregata predstavljaju skup parametara koji određuju performanse, efikasnost i radne osobine motora i sistema za prenos snage, a ključne su za analizu vučnih performansi vozila i potrošnje goriva. Među najvažnijim parametrima izdvajaju se efektivna snaga i obrtni moment, broj obrtaja kolenastog vratila, specifična potrošnja goriva, stepen iskorišćenja motora, nivo emisije izduvnih gasova, radna zapremina, broj i raspored cilindara i dr. Ove karakteristike uključuju osnovne tehničke podatke o motoru i osnovne motorske veličine, a koje utiču na ukupne performanse vozila i ekonomičnost. U saglasnosti sa navedenim, u dostupnoj tehničkoj dokumentaciji o vozilima ali i motorima, navedeni parametri često se prikazuju dijagramski, kao zavisnosti određenih motorskih veličina od broja obrtaja kolenastog vratila, tj. režima rada motora. Za ocenu zavisnosti motorskih veličina (najčešće efektivne snage i obrtnog momenta, specifične potrošnje goriva od broja obrtaja kolenastog vratila) najprisutnije su brzinske karakteristike motora. S druge strane, sistem za prenos snage predstavlja vitalni sistem u vozilu sa kojim se omogućava prenos obrtnog momenta i snage sa motora na pogonske točkove. Tehničke karakteristike sistema za prenos snage određuju efikasnost i način rada u različitim uslovima eksploatacije (efikasnost prenosa snage, mogućnost prilagođavanja obrtnog momenta i broja obrtaja, uticaj na potrošnju goriva) (Ivković, 2020). U saglasnosti sa navedenim, u cilju analize razmatranih sastava vučnih i priključnih vozila, u Tabeli 23, navedeni su tehnički parametri, razmatranih motora i sistema za prenos snage (prenosnih odnosa u glavnom prenosniku snage i pojedinim stepenima prenosa u menjaču), njihovi opisi i izvori podataka o njihovim vrednostima.

Tabela 23. Parametri pogonskih agregata vučnih vozila

Oznaka oblika karoserije	BC – tegljač	BC – tegljač	BC – tegljač	BA/08– kamion
Vrsta pogonskog goriva *k*:	dizel	dizel	KPG	KPG
Nivo izduvne emisije EURO	EURO IV	EURO VI	EURO VI	EURO VI
Broj i raspored cilindara:	6 u liniji	6 u liniji	6 u liniji	6 u liniji
Radna zapremina motora V_h [cm^3]	12902	12809	12900	8710
Maksimalna snaga motora P_{emax} [kW]	410	310	338	294
Broj obrtaja pri maksimalnoj snazi motora n_{ePemax} [o/min]	1900	1600	1900	2000
Maksimalni obrtni M_{emax} [Nm]	2750	2100	2000	1700
Broj obrtaja pri maksimalnom obrtnom momentu n_{eMemax} [o/min]	1410	1100	1100	1200
Maksimalni broj obrtaja kolenastog vratila n_{emax} [o/min]	2300	2200	2500	2500
Specifična potrošnja goriva pri maskimalnoj snazi motora q_{emax} [g/kWh]	230	187	227	227
Menjački prenosnik	Automatski	Automatski	Automatski	Automatski
Broj stepeni prenosa	12	12	12	12
Prenosni odnos				
U glavnom prenosniku – i_0	2,93	3,71	3,70	3.,36
U menjačkom prenosniku – i_i				
U prvom stepenu – i_1	12,33	14,93	12,92	15,86
U drugom stepenu – i_2	9,59	11,68	9,98	12,32
U trećem stepenu – i_3	7,44	9,13	7,67	9,56
U četvrtom stepenu – i_4	5,78	7,14	5,94	7,43
U petom stepenu – i_5	4,57	5,59	4,57	5,87
U šestom stepenu – i_6	3,55	4,37	3,53	4,56
U sedmom stepenu – i_7	2,70	3,42	2,83	3,47
U osmom stepenu – i_8	2,10	2,67	2,19	2,70
U devetom stepenu – i_9	1,63	2,09	1,68	2,09
U desetom stepenu – i_{10}	1,27	1,63	1,30	1,63
U jedanaestom stepenu – i_{11}	1,00	1,28	1,00	1,28
U dvanaestom stepenu – i_{12}	0,78	1,00	0,77	1,00

Izvor:
[1] DAF truck bodybuilding guidelines: https://www.dafbbi.com/en – technical specification;
[2] Mercedes-Benz truck bodybuilding instructions: https://bb-portal.mercedes-benz.com/- technical data – specification;
[3,4] IVECO truck bodybuilding instructions: https://newibb.iveco.com/en/Pages/Home.aspx – technical specification;

Oznake u saglasnosti sa Pravilnikom o podeli motornih i priključnih vozila i tehničkim uslovima za vozila u saobraćaju na putevima, 2025.
BC – tegljač;
BA/08 – kamion/nosač kontejnera;

Navedeni parametri pogonskih agregata dati u Tabeli 23., prikazani su kao maksimalne numeričke vrednosti brzinskih karakteristika pri punom (maksimalnom) opterećenju oto i dizel pogonskih agregata. Vrednosti predstavljaju zavisnost maksimalne efektivne snage na izlaznom vratilu pogonskog agregata P_{emax}, maksimalnog obrtnog momenta M_{emax} i specifične efektivne potrošnje g_e od broja obrtaja kolenastog vratila u jedinici vremena (broj obrtaja motora) n_e. Parametri menjačkih prenosnika snage prikazani su u zavisnosti od broja stepeni prenosa i prenosnih odnosa u pojedinim stepenima prenosa. Vrednost redukcije broja obrtaja n_e i povećanja obrtnog momenta M_{emax} do glavnog prenosnika snage, odnosno pogonskih točkova, prikazana je prenosnim odnosom u glavnom prenosniku snage i_o.

4.3 Definisanje sila koje deluju na sastav vučnog i priključnog vozila

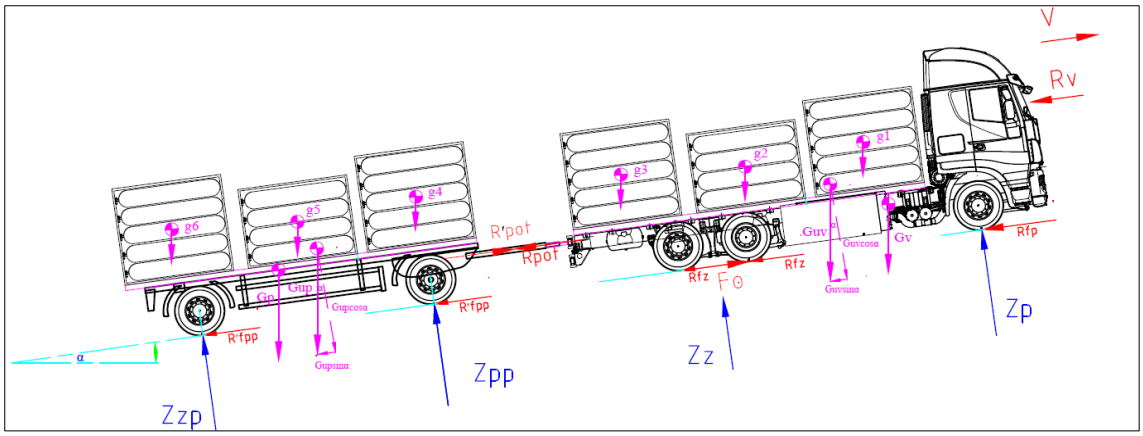
Sile koji deluju na sastav vučnog i priključnog vozila tokom kretanja u zavisnosti su od različitih faktora, koji se načelno mogu svrstati u tri kategorije, tj. uticaje prouzrokovane od vozača, eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i uslova eksploatacije (Ivković, 2020). U navedenom kontekstu, uticaj vozača se može posmatrati kroz režime kretanja. Kako je pomenuto u prethodnom poglavlju, režimi kretanja se mogu podeliti na kretanje sa i bez vučne sile i kretanja pod dejstvom kočne sile. Odnosno, ukoliko se režim kretanja posmatra u kontekstu promene brzine, u tom slučaju razlikuje se ravnomerno kretanje, kretanje sa ubrzanjem i kretanje sa usporenjem (Simić, 1988; Bunčić, 2000; Ivković, 2020). Faktori koji utiču na pojavu sila i otpora pri kretanju uzrokovani od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i uslova eksploatacije, obuhvataju širok spektar uticaja koji proizilaze od: karakteristika terena (ravničarski, brdski i planinski tereni), vrste kolovozne konstrukcije (asfalt, beton, makadam i dr.), kvaliteta puta (prisutnost neravnina i deformacija), režima kretanja, klimatskih uslova (prisutnost vetra, ambijentalne temperature, atmosferskog pritiska, i dr.), oblika i namene karoserije vozila (aerodinamičke karakterstike), masenih parametra vozila, pogonskog sistema vozila, priključnog vozila (dodatni otpori i raspodela opterećenja), pneumatika i dr. Važno je i istaći da pomenuti faktori utiču na pravac i intenzitet delovanja sila i otpora kretanju, na takav način da određene sile i otpori deluju suprotno od pravca kretanja vozila i time smanjuju efikasnost i usporavaju vozilo, dok s druge strane postoje slučajevi kada sile i otpori imaju propulzivni karakter, tj. omogućavaju savladavanje otpora i održavanje željene brzine (Simić, 1988; Demić i Lukić, 2011; Ivković, 2020). Kako je u prethodnim poglavljima istaknuto, složen proces kretanja vozila, praćen brojnim uticajnim faktorima, se pojednostavljuje i sagledava kroz režim ravnomernog kretanja. Polazeći od navedenog, u Tabeli 24., prikazani su skupovi vozila koji su razmatrani u istraživanju, dok su u nastavku rada detaljno opisane sile i reakcije tla koje deluju na skupove vozila tokom ravnomernog kretanja.

Tabela 24. Razmatrani skupovi vozila

R/b.	Oznaka skupa vozila	Sastav vučnog i priključnog vozila	Oznaka (kod) vozila	Tip nadgradnje/posude pod pritidskom	Godina proizvodnje vučnih vozila	Pogonsko gorivo
1	BC_{Dizel} + (ST) (Tip–4)	Tegljač i poluprikolica	FL	MEGC nadgradnja	2006	dizel
2	BC_{Dizel} + (ST) (Tip–1)	Tegljač i poluprikolica	FL	Baterijsko vozilo	2006	dizel
3	BC_{Dizel} + (ST) (Tip–4)	Tegljač i poluprikolica	FL	MEGC nadgradnja	2015	dizel
4	BC_{Dizel} + (ST) (Tip–1)	Tegljač i poluprikolica	FL	Baterijsko vozilo	2015	dizel
5	BC_{KPG} + (ST) (Tip–4)	Tegljač i poluprikolica	FL	MEGC nadgradnja	2018	KPG
6	BC_{KPG} + (ST) (Tip–1)	Tegljač i poluprikolica	FL	Baterijsko vozilo	2018	KPG
7	BA_{KPG} (Tip–4) + (T) (Tip–4)	Kamion i prikolica	FL	MEGC nadgradnja	2019	KPG
8	BA_{KPG} (Tip–1) + (T) (Tip–1)	Kamion i prikolica	FL	MEGC nadgradnja	2019	KPG

Izvor:
Vašalić, Ivković, Mladenović, Sekulić, Miličević and Suljovrujić. (2024). Prediction of Fuel and Exhaust Emission Costs of Heavy-Duty Vehicles Intended for Gas Transportation.

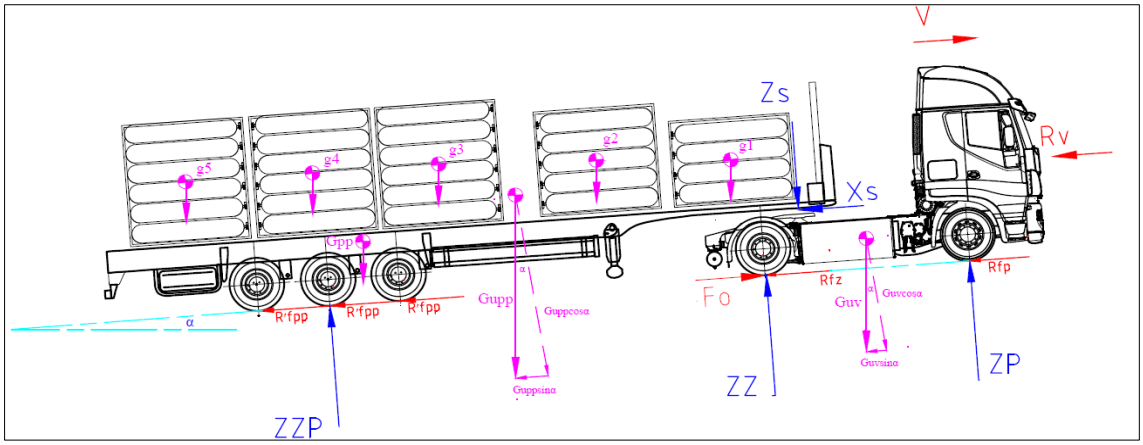
U nastavku, definisane su sile i reakcije tla koje deluju na sastav vučnog vozila i prikolice opremljenih sa MEGC nadgradnjom i posudama Tip–1. Na Slici 20., prikazane su sile, otpori pri kretanju, i reakcije tla koje deluju na sastav vučnog vozila i prikolice (BA_{Dizel} (Tip–1) + (T) (Tip–1)), za slučaj kretanja na usponu ravnomernom brzinom *(V=const).*



Slika 20. Sile i reakcije tla koje deluju na sastav vučnog vozila i prikolice sa MEGC nadgradnjom Tip–1
(Izvor: vučno vozilo: Iveco–technical drawings, priključno vozilo i nadgradnje: Autor)

gde su: G_{uv} – težina vučnog vozila, G_{up} – težina priključnog vozila, g_i – težine gasnih kontejnera, $G\cos\alpha$ – normalna komponenta težine vozila sa napadnom tačkom u težištu vozila, $g_i\cos\alpha$ – normalna komponenta težine gasnih kontejnera sa napadnom tačkom u težištu kontejnera, $\Sigma G\sin\alpha=R_u$ – otpor uspona, komponenta težine vozila sa nadgradnjom paralelna sa tlom i sa napadnom tačkom u težištu vozila, F_o – obimna sila na pogonskim točkovima, R_{fp} – otpor kotrljanja na upravljačkoj osovini vučnog vozila, R_{fz} – otpor kotrljanja na pogonskoj osovini vučnog vozila, R_v – otpor vazduha vučnog vozila, R'_{fpp} – otpor kotrljanja vođenih točkova priključnog vozila, R_{pot} – otpor priključnog vozila (otpor na poteznici), Z_p – normalna reakcija tla na prvoj (upravljačkoj osovini vučnog vozila), Z_z – normalna reakcija tla na drugoj (pogonskoj osovini vučnog vozila), Z_{pp} – normalna reakcija tla na prvoj osovini priključnog vozila, Z_{zp} – normalna reakcija tla na drugoj osovini priključnog vozila.

Na Slici 21. prikazane su sile i reakcije tla koje deluju na skup vozila (BC_{Dizel} + (ST) (Tip–1)) za slučaj kretanja na usponu ravnomernom brzinom *(V=const).*



Slika 21. Sile i reakcije tla koje deluju na sastav tegljača i poluprikolice sa baterijskom nadgradnjom Tip–1
(Izvor: vučno vozilo-tegljač: Iveco – technical drawings, priključno vozilo i nadgradnja: Autor)

gde su: Z_p – normalna reakcija tla na prvoj (upravljačkoj osovini tegljača), Z_z – normalna reakcija tla na drugoj (pogonskoj osovini tegljača), Z_s – normalna reakcija na sedlu, X_s – reakcija na sedlu paralelna sa tlom, Z_{zp} – normalna reakcija tla na drugoj osovini priključnog vozila.

Definisanje sila, otpora pri kretanju, i reakcije tla ostalih kombinacija za režim ravnomernog kretanja, detaljno su prikazane u prilogu ovog rada (Prilog 1). Jednačina vučnog bilansa, za slučaj pravolinijskog kretanja ravnomernom brzinom, prikazana je izrazom [1.8]:

$$F_o = \Sigma R = R_f + R_v + R_{tr} + R_u + R_{pv} \qquad [N]$$

$$\Sigma R = \Sigma\left(R_{vv} + R_{pv}\right) = \Sigma\left(R_f + R_v + R_u + R_{tr} + R_f' + R_v' + R_u'\right) \qquad [N] \qquad [1.8]$$

gde su: F_o – obimna sila na pogonskim točkovima [N], R_{vv} – otpori kotrljanju vučnog vozila [N], R_{pv} – otpori kotrljanju priključnog vozila [N], R_f – otpor kotrljanja [N], R_v – otpor vazduha [N], R_u – otpor uspona [N], R_{tr} – otpor sistema za prenos snage [N], R_f' – otpor kotrljanja priključnog vozila [N], R_v' – otpor vazduha priključnog vozila [N] i R_u' – otpor uspona priključnog vozila [N].

Za potrebe modela, obimna sila potrebna za savladavanje otpora kretanju, određena je izrazom [1.9]:

$$F_o = \frac{M_e \times i_m \times i_o \times \eta_p}{r_d} \qquad [N] \qquad [1.9]$$

gde su: M_e – obrtni moment [Nm], i_m – prenosni odnos menjača, i_o – prenosni odnos u glavnom prenosniku snage, η_p – ukupni koeficijent korisnosti transmisije, r_d – dinamički poluprečnik točka [m]. U analizama i tehničkim proračunima performansi vozila, često se obimna sila poistovećuje sa vučnom silom $(F_o \approx X_p)$ (Ivkovic, 2020).

Pod pretpostavkom da nema klizanja pogonskih točkova, brzina kretanja vozila (u intervalu broja obrtaja kolenastog vratila n_{emin} do n_{emin} i prenosnog odnosa u glavnom prenosniku snage i_o) za svaki stepen prenosa u menjaču i_{mi}, određena je na osnovu izraza [1.10] (Husainov and Selifonov, 2008; Ivkovic, 2020):

$$V_i = \frac{2 \times \pi \times n_e \times r_d}{60 \times i_o \times i_{mi}} \qquad \left[\frac{m}{s}\right] \qquad [1.10]$$

gde su: V_i – brzina vozila u pojedinim stepenima prenosa menjača [m/s], $2\pi/60$ konstantna vrednost sa kojom se vrši promena broja obrtaja kolenastog vratila iz vrednosti [o/min] u [rad/s], n_e – broj obrtaja kolenastog vratila u jedinici vremena [o/min], i_{mi} – prenosni odnos u pojedinim stepenima prenosa menjača.

4.3.1 Otpor kotrljanju R_f

Otpor kotrljanju R_f nastaje prvenstveno usled prilepljivanja između pneumatika i podloge, klizanja gazećeg sloja pneumatika, neravnina na putu, pojave trenja u ležištima točkova i vučnom uređaju, i predstavlja silu koja deluje suprotno od smera kretanja (Simić, 1988; Selifonov, Husainov and Lomakin, 2007; Husainov and Selifonov, 2008; Demić i Lukić, 2011; Ivković, 2020).

Ukupan otpor kotrljanju za skup vozila, jednak je zbiru otpora kotrljanju svih točkova i određen je izrazom [1.11]:

$$R_{fU} = \Sigma\left(G_i \times f_i\right) \qquad [N] \tag{1.11}$$

gde je: R_{fU} – ukupan otpor kotrljanja [N], G_i – vertikalno (radijalno) opterećenje svakog pojedinačnog točka [N], f_i – koeficijent otpora kotrljanju za dati točak (razlikuje se za pogonske i vučene točkove).

Ukupan otpor kotrljanja na usponu, srazmeran je promeni vertikalnog opterećenja svakog točka $G_i \cos\alpha$ i koeficijent otpora kotrljanju za dati točak, dat je izrazom [1.12]:

$$R_{fU} = \Sigma\left(G_i \times f_i\right) \times \cos\alpha \qquad [N] \tag{1.12}$$

4.3.1.1 Koeficijent otpora kotrljanju *f*

Koeficijent otpora kotrljanju f u zavisnosti je od: vrste i stanja podloge, tipa i konstrukcije pneumatika, pritiska u pneumaticima, vertikalnog opterećenja pneumatika, brzine kretanja vozila, relativnih pomeranja između vučnog i priključnog vozila, i dr. (Simić, 1988; Janković i Todorović, 1990; Bunčić, 2000; Wong, 2001; Selifonov et. al., 2007; Husainov and Selifonov, 2008; Demić i Lukić, 2011; Ivković, 2020). U analizama performansi teretnih vozila vrednosti koeficijenta otpora kotrljanju određuju se eksperimentalno ili analitičkim putem. Eksperimentalno određivanje zasnovano je na metodama koje posmatraju vozilo kao celinu, tj. merenjima na ispitnim poligonima (Paterlini, Yucel, Lucking and Magnuson, 2015) ili metodama koje posmatraju samo točkove, merenjima pomoću šasijskih dinanometara (Sandberg, Hammarström, Haider, Conter, Goubert, Bergiers and Harvey, 2011; Hyttinen, Ussner, Österlöf, Jerrelind, and Drugge, 2023). S druge strane, analitičko određivanje koeficijenta otpora kotrljanju zasnovano je na primeni empirijskih formula utemeljenih na podacima dobijenim tokom eksperimentalnih merenja. Vrednosti koeficijenata i složenost primenjenih formula u zavisnosti su od početnih zahteva analiza i niza parametara, poput brzine kretanja, konstrukcije i materijala izrade pneumatika, pritiska i vertikalnog opterećenja pneumatika, karakteristika podloge i dr. (Rexeis, Hausberger, Riemersma, Tartakovsky, Zvirin, Van Poppel and Cornelis, 2005; Hammarström, Karlsson, Sörensen and Yahya, 2012; Kang, Ozer, Al-Qadi and Spencer, 2019). U slučaju teretnih vozila, parametri koji dodatno utiču na razliku između koeficijenta otpora kotrljanju pogonskih f_p i vođenih točkova f_v su maseni parametri i relativna pomeranja između vučnog i priključnog vozila. Pneumatici na pogonskoj osovini izloženiji su većim deformacijama (usled raspodele masa, prenosa vučne sile, većih sila trenja između elemenata pneumatika i podloge, i dr.) u odnosu na vođene točkove. Takođe i pojava relativnih pomeranja između elemenata spajanja (poteznice ili sedla) vučnog i priključnog vozila utiče na razliku između koeficijenta (Bunčić, 2000; Ivković, 2020).

Polazeći od navedenog, za potrebe modela vrednosti koeficijenta otpora kotrljanju utvrđene su za pogonske točkove f_p i za vođene točkove f_v i u zavisnosti su od vrste i stanja kolovozne konstrukcije, konstrukcije pneumatika i brzine kretanja, primenom izraza (Janković i Todorović, 1990; Wong, 2001; Ivković, 2020) [1.13]:

$$f = f_o + \left[6,48 \times 10^{-6} \times V^2 \right] \qquad [1.13]$$

gde je: V – brzina vozila [m/s], f_o – predstavlja konstantnu vrednosti koeficijenta otpora kotrljanju za nedeformabilnu (tvrdu) podlogu, a čije se vrednosti određene eksperimentalno. Vrednosti koeficijenta f_o, prikazane u Tabeli 25, odnose se na pneumatike teretnih vozila sa radijalnom konstrukcijom na različitim vrstama i stanju kolovozne konstrukcije (podloge).

Tabela 25. Vrednosti koeficijenta otpora kotrljanju f_o

Vrsta i stanje podloge	f_o [–]	Vrsta i stanje podloge	f_o [–]	Vrsta i stanje podloge	f_o [–]
Asfalt (dobar)	0,006 – 0,01	Beton (dobar)	0,006 – 0,01	Makadam (dobar)	0,012 – 0,023
Asfalt (prosečan)	0,013 – 0,02	Beton (prosečan)	0,011 – 0,015	Makadam (prosečan)	0,018 – 0,035

Izvor:
[1] Robert Bosch GmbH. 2022. Automotive Handbook;
[2] Selifonov et. al., 2007.

Otpor kotrljanju [1.14] za pogonske i vođene točkove razmatranih skupova vozila, određen je na osnovu izraza [1.13]:

$$R_{fp} = G_p \cdot f_p \cdot \cos\alpha \quad [N]$$

$$R_{fv} = G_v \cdot f_v \cdot \cos\alpha \quad [N] \qquad [1.14]$$

gde su: R_{fp} – otpor kotrljanja pogonskih točkova [N], G_p – vertikalno opterećenje na pogonskim točkovima, R_{fv} – otpor kotrljanja vođenih [N], G_v – vertikalno opterećenje na vođenim točkovima [N].

Na osnovu izraza [1.14], za slučaj sastava vučnog vozila i prikolice prikazanog na Slici 19., u razvijenom obliku ukupni otpor kotrljanju prikazan je izrazima [1.15]:

$$R_f = \left(R_{fv1} + R_{fp2} + R_{fv3} + R'_{fv1} + R'_{fv2} \right) \quad [N]$$

$$R_f = \left(G_{1vv} \cdot f_v + G_{2vv} \cdot f_p + G_{3vv} \cdot f_v + G_{1p} \cdot f_v + G_{2p} \cdot f_v \right) \cdot \cos\alpha \quad [N] \qquad [1.15]$$

gde je: R_{fi} – otpor kotrljanja na točkovima vučnog vozila [N], R'_{fi} – otpor kotrljanja na točkovima prikolice, G_{1vv} – vertikalno opterećenje na vođenim točkovima prve osovine (upravljačka osovina) vučnog vozila [N], G_{2vv} – vertikalno opterećenje na pogonskim točkovima druge osovine (pogonska osovina) vučnog vozila [N], G_{3vv} – vertikalno opterećenje na vođenim točkovima treće osovine vučnog vozila [N], G_{1p} – vertikalno opterećenje na vođenim točkovima prve osovine prikolice [N], G_{2p} – vertikalno opterećenje na vođenim točkovima druge osovine prikolice [N].

Za slučaj sastava, tegljača i poluprikolice prikazanog na Slici 20. u razvijenom obliku ukupni otpor kotrljanju, prikazan je izrazima [1.16]:

$$R_f = \left(R_{fv1} + R_{fp2} + R'_{fv1} + R'_{fv2} + R'_{fv3}\right) \quad [N]$$

$$R_f = \left(G_{1vv} \cdot f_v + G_{2vv} \cdot f_p + G_{1p} \cdot f_v + G_{2v} \cdot f_v + G_{3p} \cdot f_v\right) \cdot \cos\alpha \quad [N] \qquad [1.16]$$

4.3.2 Otpor uspona R_u

Otpor uspona R_u predstavlja projekciju težine vozila na pravac kretanja (Simić, 1988; Janković i Todorović, 1990; Demić i Lukić, 2011; Ivković, 2020). Vrednosti otpora uspona određene su primenom izraza [1.17]. Za slučaj kretanja sastava niz padinu, komponenta *(G·sinα)* menja karakter dejstva, više ne predstavlja otpor kretanju već ima karakter vučne sile.

$$R_{uvv} = G_{vv} \times \sin\alpha \quad [N]$$

$$R'_{upv} = G_p \times \sin\alpha \quad [N] \qquad [1.17]$$

gde je: R_{uvv} – otpor uspona vučnog vozila [N], R'_{upv} – otpor uspona priključnog vozila [N], G_{vv} – ukupna težina vučnog vozila [N], G_p – ukupna težina priključnog vozila [N].

4.3.3 Otpor vazduha R_v

Otpor vazduha vozila R_v je sila kojom se vazduh suprotstavlja kretanju vozila. Kod teretnih vozila, posebno sastava vučnih i priključnih vozila, otpor vazduha razlaže se na dve komponente, tj. otpore koji proizilaze od vučnog vozila R_{vv} i priključnog vozila R'_{vp}. Navedeni otpori u zavisnosti su od brzine kretanja, brzine i smera dejstva vetra, gustine vazduha, prisutnosti aerodinamičkih površina na vozilima, pojave vrtloženja vazdušnih struja izazvanih povećanjem rastojanja između vučnog i priključnog vozila, visinske razlike između vučnog i priključnog vozila, i dr.) (Simić, 1988; Bunčić, 2000; Heisler, 2002; Dedović, Mladenović i Sekulić, 2017; Ivković, 2020).

U kontekstu navedenog, vrednosti otpora vazduha vučnog vozila određene su primenom izraza [1.18]:

$$R_v = \frac{c_x \times \rho_v}{2} \times A \times \left(V \pm V_v\right)^2 \quad [N] \qquad [1.18]$$

gde su: c_x – koeficijent otpora vazduha [–], A – čeona površina vozila [m²], ρ – gustina vazduha [kg/m³] navedeno u Poglavlju 4.2, V – brzina kretanja vozila [m/s] i V_v – brzina vetra [m/s]. Brzina vetra u zavisnosti je od smera dejstva vetra i može imati pozitivnu ili negativnu vrednost.

Takođe, bitno je napomenuti da je analitičko određivanje otpora vazduha sastava vozila, zasnovano na primeni empririjskih formula, koje obuhvataju koeficijente otpora vazduha vučnih i priključnih vozila. Navedeni koeficijenti utvrđuju se ekperimentalno, ispitivanjima u aerotunelima ili modeliranjem–primenom savremenih softverskih alata (Heisler, 2002,

Landman, Wood, Seay and Bledsoe, 2009; Landman, Cragun, McCormick and Wood, 2011). Za potrebe funkcionisanja modela, ukupni otpor vazduha skupa vozila, predstavljen je uvećanjem otpora vazduha vučnog vozila [1.18] za 15% (Simić, 1988; Heisler, 2002; Ivković, 2020).

Koeficijent otpora vazduha c_x u zavisnosti je od oblika i namene karoserije, aerodinamičkih karakteristika, tj. postojanja aerodinamičkih površina, ravnosti površina na kabini i karoseriji vozila, razmaka između vučnog i priključnog vozila i dr. Vrednosti koeficijenta c_x koje su korišćene za potrebe ovog istraživanja, prikazane su u Tabeli 26.

Tabela 26. Vrednosti koeficijenta otpora vazduha c_x

Oznaka vozila – sastava	c_x
Teretna vozila	0,448 – 0,659
Vučno vozilo i prikolica	0,550 – 0,900
Tegljač i poluprikolica	0,369 – 0,534

Izvor:
Landman i ostali, 2009 i 2011.

S druge strane, čeona površina vozila *A* predstavlja projekciju vučnog vozila na ravan normalnu na pravac kretanja. Vrednost čeone površine zavisi od oblika karoserije, postojanja aerodinamičkih površina i visinske razlike između vučnog i priključnog vozila (Heisler, 2002). U zavisnosti od početnih zahteva analize, vrednosti čeone površine moguće je odrediti na više načina: eksperimentalnim putem, analitičkim putem primenom složenih formula ili primenom softverskih paketa namenjenih za projektovanje i simulacije pomoću računara. Eksperimetalno određivanje čeonih površina vozila zasnovano je na metodama koje posmatraju vozilo kao celinu, ispitivanjima u posebnim uslovima primenom aerotunela ili ispitivanjima zasnovanim na metodi senke (Brennan, Worm and Morgan, 2013). Navedene metode odlikuje visoka tačnost. Analitičko određivanje zasnovano je na primeni empirijskih formula koje uzimaju u obzir dimenzione parametre vozila (visinu i širinu) uz mogućnost korekcije na osnovu aerodinamičkih faktora, sa kojima je moguće proceniti čeonu površinu. Tačnost rezultata u zavisnosti je od broja i kvaliteta ulaznih podataka (Simić, 1988; Janković i Todorović, 1990; Emam, 2011; Ivković, 2020). Pored navedenih metoda, određivanje čeone površine vozila moguće je izvesti i planimetrisanjem tehničkih crteža primenom softverskih paketa. Vodeći evropski proizvođači teretnih vozila na svojim zvaničnim internet stranicama, uz posebne dozvole i na osnovu identifikacione oznake vozila VIN *(engl. Vehicle Identification Number),* dostavljaju tehničke crteže vozila, na osnovu kojih je moguće odrediti vrednost čeonih površina vozila ali i dimenzione parametre vozila. Vrednosti čeonih površina vučnih vozila *A*, utvrđene na osnovu tehničke dokumentacije proizvođača vozila i merenjem u realnim uslovima, prikazane su u Tabeli 27.

Tabela 27. Čeone površine poređenh vučnih vozila

Oznaka oblika karoserije:	BC – tegljač[1]	BC – tegljač[2]	BC – tegljač[3]	BA/08– kamion[3]
A [m²]:	6,2	5,6	8,4	8,1

Izvor:
[1] https://www.dafbbi.com/en - tehnical specification – technical drawing;
[2] https://bb-portal.mercedes-benz.com/- tehnical data – specification – technical drawing;
[3] https://newibb.iveco.com/en/Pages/Home.aspx - tehnical specification – technical drawing.

4.3.4 Otpor sistema za prenos snage R_{tr}

Pojava unutrašnjeg otpora koji se javlja zbog složenosti transmisije izazvanog trenjem radnih elemenata, predstavlja otpor sistema za prenos snage R_{tr}. Otpor sistema za prenos snage

u zavisnosti je od: broja pogonskih osovina, spojnice, menjačkog prenosnika, zglobnih prenosnika, diferencijalnog prenosnika, glavnog prenosnika, brzine vozila, sistema za podmazivanje i dr. Vrednosti otpora sistema za prenos snage izražavaju se preko ukupnog koeficijenta korisnosti transmisije *(η_p)* (Demić i Lukić, 2011; Ivković, 2020).

Vrednosti otpora sistema za prenos snage, određene su primenom izraza [1.19]:

$$R_{tr} = \left(1-\eta_p\right)\times\Sigma R \quad [N] \qquad [1.19]$$

Ukupni mehanički koeficijent korisnosti transmisije moguće je odrediti eksperimentalnim putem primenom šasijskog dinamometra (Irimescu, Mihon and Pãdure, 2011) ili analitičkim putem primenom formula u kojima je promena koeficijenta η_p u zavisnosti od koncepcije gradnje sistema za prenos snage (Litvinov i Farobin, 1989). Uprošćena šema sistema za prenos snage kod vučnih vozila, osovinske konfiguracije 4x2 i 6x2 sa pogonom na zadnjoj osovini i podužno postavljenim elementima transmisije, sadrži: spojnicu, menjački prenosnik snage, bočni reduktor, zglobni (kardanski) prenosnik snage, glavni prenosnik snage i pogonska poluvratila. Za potrebe modela, mehanički koeficijent korisnosti transmisije η_p za vozila osovinske konfiguracije 4x2 i 6x2, sa podužno postavljenim transmisionim elementima i pogonom na zadnjoj osovini u najopštijem obliku određen je izrazom [1.20] (Litvinov i Farobin, 1989; Simić, 1988):

$$\eta_p = \eta_{ps}\times\eta_{pm}\times\eta_{pzp}\times\eta_{pgp}\times\eta_{ppv} \qquad [1.20]$$

gde su: η_{ps} – koeficijent korisnosti spojnice [0,99], η_{pm} – koeficijent korisnosti menjačkog prenosnika [0,94–0,98], η_{pzp} – koeficijent korisnosti zglobnog prenosnika [0,98–0,99], η_{pgp} – koeficijent korisnosti diferencijalnog i glavnog prenosnika [0,94–0.99], η_{ppv} – koeficijent korisnosti lezajeva pogonskog poluvratila [0,995] (Litvinov i Farobin, 1989; Simić, 1988; Ivković, 2020). Vrednosti koeficijenta korisnosti menjačkog prenosnika η_{pm} najmanje su u prvom a najveće u poslednjem stepenu prenosa. U praktičnim analizama uzima se razlika [$\eta_{pmi} - \eta_{pmI} = 0{,}02$] (Ivković, 2020).

4.3.5 Otpori priključnog vozila R_p

Tokom kretanja sastava vučnog i priključnog vozila javljaju se otpori pri kretanju koje možemo podeliti na otpore koji potiču od vučnih vozila i otpore koji potiču od priključnih vozila. Otpori priključnih vozila R_p, u literaturi prisutni su i nazivi otpori na poteznici, predstavljaju zbir svih otpora kretanju izazvanih od priključnih vozila (Demić i Lukić, 2011; Ivković, 2020). Prema načinu spajanja, tj. prema uređajima preko kojih se vrši spajanje između vučnih i priključnih vozila, sastave vozila delimo na: sastave koji vezu ostvaruju preko zgloba sedla (tegljače i poluprikolice) i na sastave koji vezu ostvaruju posredstvom poteznice (vučna vozila i prikolice). Otpor priključnog vozila za slučaj pravolinijskog kretanja konstantnom brzinom, određen je opštim izrazom [1.8]. Bitno je napomenuti da vrednosti utvrđene izrazom [1.8] važe pod pretpostavkom da otpor na poteznici deluje u horizontalnoj ravni sa vučnim vozilom. Za slučaj da poteznica nije u horizontalnoj ravni sa vučnim vozilom već se nalazi pod nekim nagibom α_1, potrebno je uzeti u obzir ugao nagiba i otpor na poteznici razložiti na dve komponente $R_p sin\alpha_1$ i $R_p cos\alpha_1$ (Demić i Lukić, 2011; Ivković, 2020).

Otpor priključnog vozila, sastava vučnog vozila i prikolice prikazanog na Slici 19., određen je pomoću izraza [1.21]:

$$R_p = \left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + G_p \times \sin\alpha \qquad [N] \qquad [1.21]$$

Međusobni uticaji koji se javljaju tokom pravolinijskog kretanja kod sastava tegljača i poluprikolice, dovode do pojave normalnih i tangencijalnih dinamičkih reakcija u osloncu (zglobu) sedla. Opterećenja izazvana od poluprikolice u osloncu sedla ražlažu se na tangencijalne (horizontalne) reakcije X_s izazvane od smičućih opterećenja tokom kretanja i normalne (vertikalne) reakcije Z_s izazvane od sile pritiska. Tangencijalne reakcije deluju u horizontalnoj ravni (duž ose kretanja tegljača) i javljaju se od naglih promena brzine, otpora vazduha, bočnih opterećenja, neravnina na putu, itd. Normalne reakcije zavise od ukupne mase poluprikolice i raspodele tereta i direktno utiču na opterećenje pogonskih osovina tegljača. Reakcije oslonaca u zglobu sedla detaljno su prikazane u prilogu rada (Prilog 1).

Otpor priključnog vozila, sastava tegljača i poluprikolice prikazanog na Slici 20., određen je pomoću izraza [1.22] i [1.23]. Tangencijalna reakcija koja se javlja u osloncu sedla, određena je izrazom [1.22]:

$$X_s = \left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v + G_{3p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + G_p \times \sin\alpha \qquad [N] \qquad [1.22]$$

Normalna reakcija koja se javlja u osloncu sedla, određena je izrazom [1.23]:

$$Z_s = \frac{G_p \cos\alpha \times l_{to} + X_s \times h_s - G_p \sin\alpha \times h_{tp}}{l} \qquad [N] \qquad [1.23]$$

Kada vrednosti X_s iz izraza [1.22] uvrstimo u izraz [1.23], dobija se normalna reakcija na sedlu u razvijenom obliku [1.24]:

$$Z_s = \frac{G_p \cos\alpha \times l_{to} + \left(\left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v + G_{3p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + G_p \times \sin\alpha\right) \times h_s - G_p \sin\alpha \times h_{tp}}{l}$$

gde su: Z_s – normalna reakcija u osloncu sedla, X_s – tangencijalna reakcija u osloncu sedla, G_{pp} – ukupna težina poluprikolice, G_{1p} – vertikalno opterećenje na vođenim točkovima prve osovine poluprikolice [N], G_{2p} – vertikalno opterećenje na vođenim točkovima druge osovine poluprikolice [N], G_{3p} – vertikalno opterećenje na vođenim točkovima treće osovine poluprikolice [N], f_v – koeficijent otpora kotrljanju za vođenih točkova, l – rastojanje od ose vučnog čepa do druge osovine priključnog vozila, l_{to} – koordinata težišta priključnog vozila paralelna sa tlom, h_t – visina težišta priključnog vozila, h_s – visina sedla.

4.4 Metode određivanja potrošnje goriva

4.4.1 Metoda određivanja potrošnje goriva primenom brzinske karakteristike motora

Metoda, koju je prvi predložio Šlipe *(I. S. Schlippe)*, predstavlja analitički pristup za određivanje specifične efektivne potrošnje goriva i izražava se kao funkcija tri veličine. Funkciju definišu specifična efektivna potrošnja goriva pri maksimalnoj snazi motora i koeficijenti koji opisuju promenu specifične efektivne potrošnje goriva u funkciji od promene broja obrtaja kolenastog vratila i u zavisnosti od stepena iskorišćenja snage motora (Bunčić, 2000; Selifonov, Husainov and Lomakin, 2007; Kravets, Musarsky and Tumasov, 2015). Metoda uzima u obzir odnos između snage potrebne za savladavanje otpora kretanju i snage dostupne na pogonskim točkovima, kao i odnos između trenutnog broja obrtaja kolenastog vratila i broja obrtaja kolenastog vratila pri maksimalnoj snazi motora, na promenu specifične potrošnje goriva. Takođe, pored karakteristika koje opisuju motore i eksploataciono–tehničke karakteristike vozila, metoda obuhvata parametre koji potiču od uslova eksploatacije vozila (klimatske, transportne i putne), odnosno njihove uticaje na pojavu sila i otpora pri kretanju vozila. Svoju primenu nalazi prilikom analiza performansi vozila, u postupcima procene potrošnje goriva, pri različitim opterećenjima, u funkciji od brzine kretanja. Prednosti metode su, pre svega, dostupnost i mogućnost primene na motore sa različitim vrstama ugljovodoničnih goriva. Važno je i istaći da je tačnost metode uslovljena brojem i kvalitetom ulaznih parametara. Nasuprot navedenom, veliki broj i otežana dostupnost određenih ulaznih parametara, pre svega pogonskih karakteristika motora, predstavljaju osnovne poteškoće kod primene ove metode.

Pogonske karakteristike predstavljaju zavisnost motorskih veličina (najčešće veličina poput efektivne snage, efektivnog obrtnog momenta, specifične efektivne potrošnje goriva i dr.) od režima rada motora. Režim rada motora utvrđen je brojem obrtaja kolenastog vratila i položajem regulacionog uređaja, tj. poluge za ubrizgavanje goriva kod dizel, odnosno otvora leptira kod oto motora. U zavisnosti od režima rada, tj. načina ispitivanja na probnom stolu, razlikujemo nekoliko grupa pogonskih karakteristika motora, poput brzinskih karakteristika, univerzalnih karakteristika, regulatorskih karakteristika, karakteristika opterećenja i dr. (Tomić i Petrović, 2000; Ivković, 2020). U dostupnim tehničkim podacima koji se odnose na pogonske karakteristike motora namenjenih za pogon teretnih vozila, najprisutnije su brzinske karakteristike pri punom opterećenju, u literaturnim izvorima prisutni su i nazivi spoljno brzinske karakteristike ili krive pune snage. U literaturi moguće je naći niz istraživanja zasnovanih na analitičkom pristupu određivanja potrošnje goriva primenom brzinske karakteristike motora, tj. metodi Šlipea (Ben-Chaim, Shmerling and Kuperman, 2013; Kravets et. al., 2015; Bas, Kravets, Ziborov, Fedoriachenko, Krivda, Fedoriachenko, S., and Kornilenko, 2017; Mamontov, Shevtsov and Rezvaya, 2022). Istraživanja obuhvataju različite pristupe analize i izbora ulaznih parametara, pre svega, eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i motora, kao i parametara koji potiču od uslova eksploatacije vozila. Poseban akcenat je stavljen na modele i metodologije koje uzimaju u obzir parametre koji potiču od uslova eksploatacije vozila, tj. parametre koji u određenoj meri opisuju uticaje transportnih, putnih i klimatskih uslova na otpore kretanju i potrošnju goriva. Autori (Ben-Chaim et. al., 2013) prezentuju model za analitičko određivanje potrošnje goriva kod vozila sa oto i dizel motorima. Predloženi model, razvijen za režime ravnomernog kretanja i kretanja sa ubrzanjem, obuhvata uticaje koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, transportnih i putnih uslova eksploatacije. Kao osnovni doprinos modela navodi se postupak za procenu potrošnje goriva zasnovan na dostupnim podacima o vozilima i motorima, pritom uzimajući u obzir transportne i putne uslove, čime se isključuje potreba za složenim putnim

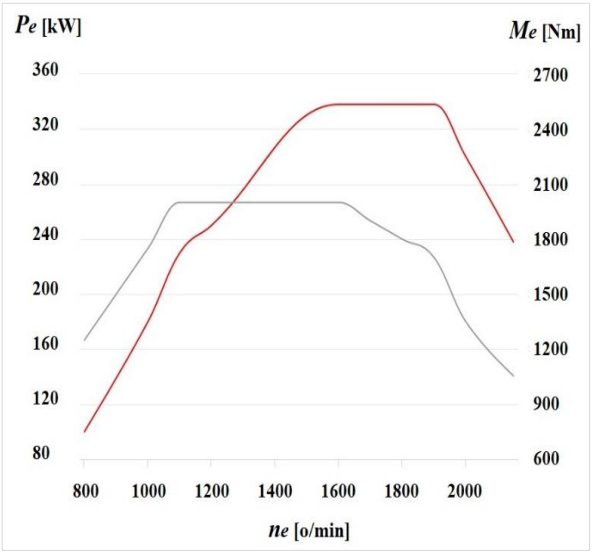
merenjima. Model pokazuje visoku tačnost pri proceni potrošnje goriva u uslovima gradske i međugradske vožnje. S druge strane autori (Kravets et. al., 2015) u radu prezentuju metodologiju za analitičko određivanje potrošnje goriva kod lakih teretnih vozila za ravnomerni režim kretanja. Razvijena metodologija uzima u obzir parametre koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i putnih uslova eksploatacije, na povećanje otpora kretanju prilikom analize vučno–dinamičkih karakteristika vozila. Primenom rezultata analize i metode Šlipea, za karakteristične putne uslove, određuje se zavisnost potrošnje goriva od brzine kretanja vozila i ukupnog koeficijenta otpora puta. Doprinos istraživanja predstavlja razvijeni postupak koji omogućava procenu potrošnje goriva visoke tačnosti, primenom dostupnih tehničkih podataka o vozilima, motorima, kao i parametrima koji opisuju putne uslove eksploatacije. Model za određivanje specifične potrošnje goriva kod vozila na hibridni pogon prezentovan je u istraživanju (Bas et. al., 2017). Razvijeni postupak modela povezuje promene snage, broja obrtaja kolenastog vratila i specifične potrošnje goriva sa ulaznim parametrima koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila. Kao ključni doprinos istraživanja izdvaja se razvijeni postupak koji omogućava procenu potrošnje goriva visoke tačnosti primenom dostupnih tehničkih podataka o vozilima i motorima. Autori (Mamontov et. al., 2022) u radu prezentuju metodologiju za utvrđivanje vučno–dinamičkih karakteristika vozila i analitičko određivanje karakteristike ekonomičnosti potrošnje goriva, kod putničkih vozila opremljenih sa oto i dizel motorima. Postupak za analitičko određivanje potrošnje goriva, razvijen za režim ravnomernog kretanja, uzima u obzir rezultate analize vučno–dinamičkih karakteristika vozila i parametre koji opisuju transportne i putne uslove eksploatacije. Doprinos istraživanja predstavlja razvijeni metodološki postupak sa setom jednačina, koji omogućava analizu performansi vozila i određivanje potrošnje goriva u zavisnosti od brzine kretanja i otpora puta, na osnovu dostupnih podataka o vozilima i uslovima eksploatacije. Osnovna sličnost prethodnih istraživanja sa modelima razvijenim u okviru ove disertacije je primena analitičkog pristupa za određivanje specifične efektivne potrošnje goriva, odnosno primena metode Šlipea. Predloženom metodom povezuju se podaci iz brzinskeih karakteristika motora (efektivna snaga, obrtni moment, broj obrtaja kolenastog vratila i specifična efektivna potrošnja goriva pri maksimalnoj snazi) sa parametrima koji potiču od uslova eksploatacije u svrhu određivanja specifične potrošnje goriva u funkciji od brzine kretanja. Dalje u tekstu, obrađene su teorijske osnove neophodne za funkcionisanje metode.

4.4.1.1 Brzinske karakteristike motora pri punom opterećenju

Brzinske karakteristike motora pri punom opterećenju (maksimalan otvor leptira kod oto, odnosno poluge u pumpi za ubrizgavanje goriva kod dizel motora) prikazuju zavisnost efektivne snage P_e i efektivnog obrtnog momenta M_e od broja obrtaja kolenastog vratila n_e. Pored navedenih osnovnih motorskih veličina, karakteristike mogu sadržati i krivu promene specifične efektivne potrošnje goriva g_e u funkciji od broja obrtaja kolenastog vratila n_e (Tomić i Petrović, 2000; Martyr and Plint, 2012; Ivković, 2020). Ekonomičnost rada motora pogodno je posmatrati preko specifične efektivne potrošnje goriva g_e, koja definiše potrebnu količinu goriva u jedinici vremena za razvijanje snage i izražava se u gramima sagorelog goriva po kilovatsatu (Simić, 1988). U dostupnim tehničkim podacima za određene motore, vrednosti g_e umesto krive promene u funkciji od broja obrtaja n_e, najčešće se prikazuje kao konačna jedinična vrednost specifične efektivne potrošnje goriva pri maksimalnoj snazi motora g_{emax}, prikazano u Tabeli 23.

Merenje brzinskih karakteristika motora vrši se na probnim stolovima, primenom motorskih dinamometara sa kojima se simulira spoljno opterećenje, navedeno u poglavlju 3. Na Slici 22.,

dat je primer dijagrama brzinske karakteristike motora (velike radne zapremine sa pogonom na prirodni gas, opremljenog uređajima za natpunjenje i regulaciju obrtnog momenta) pri punom opterećenju. Ovaj dijagram na apscisnoj osi sadrži broj obrtaja kolenastog vratila n_e, a na ordinatnim osama efektivni moment M_e, odnosno efektivnu snagu P_e motora. Zavisnost efektivnog momenta M_e od broja obrtaja kolenastog vratila n_e označena je sivom bojom. Linija konstantne maksimalne vrednosti M_{emax} (regulacija obrtnog momenta) očitava se u opsegu n_e od 1100 do 1600 o/min. Zavisnost efektivne snage P_e od n_e, označena je crvenom bojom. Linija koja odgovara približno linearnom povećanju snage P_e očitava se u opsegu n_e od 800 do ≈ 1550 o/min, a linija konstantne maksimalne vrednosti P_{emax} očitava se za broj obrtaja od 1600 do 1900 o/min. Savremeni motori sa unutrašnjim sagorevanjem (motori SUS) namenjeni za teretna vozila opremljeni su elektronski kontrolisanim uređajima za poboljšanje performansi i regulaciju rada, poput uređaja za natpunjenje, posebnim ventilima za regulaciju pritiska vazduha u usisnom vodu, uređajima koji omogućavaju promenljiv rad ventila i dr. (Ivković, 2020). Primena elektronski kontrolisanih uređaja za natpunjenje i regulaciju rada, ogleda se prvenstveno kroz povećanje obrtnog momenta i snage, tj. zadržavanjem konstantne vrednosti obrtnog momenta u određenom opsegu broja obrtaja kolenastog vratila, dok se snaga u tom opsegu približno linearno povećava. Ulazni parametri razmatranih pogonskih agregata vučnih vozila, tj. maksimalne vrednosti njihovih osnovnih motorskih veličina, date su u Tabeli 23. U sledećem odeljku opisan je postupak utvrđivanja specifične potrošnje goriva, tj. postupak metode.



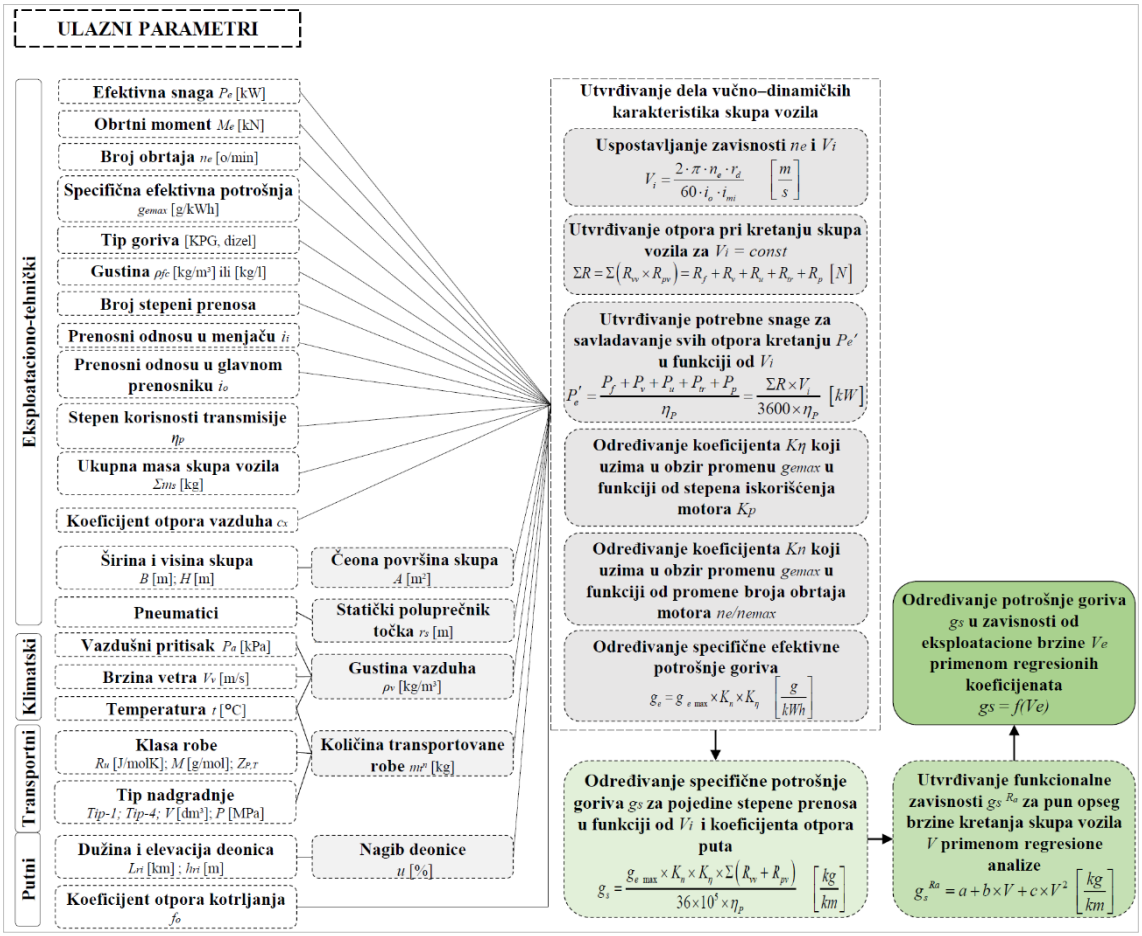
Slika 22. Brzinska karakteristika oto motora pri punom opterećenju *(Izvor: FPT, 2025)*

4.4.1.2 Određivanje potrošnje goriva primenom metode Šlipea

Model prikazan na Slici 23. predstavlja postupak za određivanje potrošnje goriva zasnovan na metodi Šlipea. Razvijeni postupak primenom odgovarajućih funkcionalnih zavisnosti, povezuje podatke o eksploataciono–tehničkim karakteristikama vozila i nadgradnji sa parametrima klimatskih, transportnih i putnih uslova eksploatacije i predstavlja osnovu za određivanje specifične potrošnje goriva u funkciji od eksploatacione brzine kretanja vozila. Postupak se odvija kroz nekoliko koraka.

U prvom koraku, neophodno je identifikovati sve potrebne ulazne parametre koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, i uslova eksploatacije detaljno opisane u poglavljima 3 i 4. Eksploataciono–tehničke karakteristike vozila obuhvataju parametre motora (vrednosti efektivne snage P_e i efektivnog obrtnog momenta M_e u određenom opsegu broja obrtaja kolenastog vratila n_e, kao i vrednost specifične efektivne potrošnje goriva g_{emax} pri maksimalnoj snazi motora P_{emax}, preuzete iz dijagrama brzinske karakteristika pri punom opterećenju). Takođe, uključuju parametre o vrsti pogonskog goriva i njegovoj zapreminskoj masi ρ_{fc} (parametri koji opisuju podelu motora prema odvijanju procesa sagorevanja, tj. načinu upaljenja smeše, oto i dizel motori), kao i parametre transmisije (broj stepeni prenosa u menjačkom prenosniku snage, prenosne odnose u pojedinim stepenima

prenosa i_i, odosno prenosni odnos u glavnom prenosniku snage i_o) preuzete iz tehničke dokumentacije o vozilima, navedeno u poglavlju 3. Zavisnost otpora sistema za prenos snage izražena je preko mehaničkog stepena korisnosti transmisije η_p, detaljno opisano u poglavljima 4.3. Parametri koji se odnose na mase i dimenzije vozila, aerodinamičke karakteristike i pneumatike vozila, utvrđeni su na osnovu tehničke dokumentacije ili merenjem. U zavisnosti od tipa skupa vozila i dimenzije pneumatika, posebno se utvrđuju vrednosti koeficijenta otpora vazduha c_x i vrednosti statičkog poluprečnika točka r_s i koeficijenta otpora kotrljanju f_o, navedeno u poglavlju 4.3.



Slika 23. Postupak procene potrošnje goriva zasnovan na metodi Šlipea

Klimatskim uslovima obuhvaćeni su parametri koji su implicitno sadržani u izrazima koji opisuju otpore kretanju, poput otpora vazduha, gde gustina vazduha ρ_v, temperatura t, vazdušni pritisak P_a i brzina vetra V_v indirektno utiču na veličinu otpora. Takođe, obuhvaćen je uticaj spoljne temperature na parametre koji opisuju transportne uslove, tj. na povećanje – odnosno smanjene količine transportovane gasa m_t i ukupne mase skupa vozila navedeno u poglavlju 4.2 i 6.

Transportnim uslovima obuhvaćeni su parametri poput klase robe i tipa nadgradnje, tj. uticaji fizičko–hemijskih osobina robe (molarna masa M, univerzalna gasna konstanta R_u i faktor kompresibilnosti $Z_{P,T}$) i tehničkih karakteristika posuda (radni pritisak P^n i radna zapremina V^n) na količinu transportovane robe m_t^n, odnosno otpore kretanju vozila. Putnim uslovima obuhvaćeni su parametri koji opisuju trasu transporta, tj. dužinu deonica L_{ri} i elevaciju deonica h_{ri} (neophodne za utvrđivanje podužnih nagiba deonica u), kao i vrstu i stanje kolovozne

konstrukcije (neophodne za utvrđivanje početnih vrednosti koeficijenta otpora kotrljanju f_o) navedeno u poglavlju 4.2 i 4.3.

Postupak dela analize vučno–dinamičkih performansi opisan u poglavljima 4.2 i 4.3, predstavlja ključnu osnovu za formiranje ulaznih podataka za određivanje specifične potrošnje goriva zasnovanu na metodi Šlipea. Smisao uvođenja analize jeste ocena vučno–dinamičkih svojstava vozila. Primenom bilansa snage razmatra se uticaj oblika krive brzinske karakteristike motora, kao i prenosnog odnosa u glavnom prenosniku snage, na vučno–dinamička svojstva vozila, odnosno na efikasnost rada motora i specifičnu potrošnju goriva (Ivković, 2020).

U drugom koraku potrebno je uspostaviti vezu između broja obrtaja kolenastog vratila n_e i brzine kretanja skupa vozila V_i za pojedine stepene prenosa u menjačkom prenosniku snage. Takođe, potrebno je utvrditi sve otpore kretanju koji deluju na skup vozila (sastav vučnog i priključnog vozila) pri ravnomernom kretanju. Veza između n_e i V_i uspostavljena je izrazom [1.10], a suma otpora kretanju prikazana izrazom [1.8], detaljno opisano u poglavlju 4.3.

U trećem koraku potrebno je utvrditi snagu motora potrebnu za savladavanje svih otpora kretanju koji deluju na skup vozila P_e' u funkciji od broja obrtaja kolenastog vratila n_e, odnosno brzine kretanja vozila V_i za pojedine stepene prenosa menjačkom prenosniku snage. Na osnovu bilansa snage, za uslove kretanje bez klizanja, vrednosti P_e' možemo izraziti preko pojedinačnih snaga otpora, tj. otpora kotrljanju, primenom izraza [1.25] (Bunčić, 2000; Selifonov et al., 2007; Ivkovic i Spasić, 2023):

$$P_e' = \frac{\Sigma P}{\eta_P} = \frac{P_f + P_v + P_u + P_{tr} + P_p}{\eta_P} = \frac{\Sigma R \times V_i}{3600 \times \eta_P} \qquad [kW] \qquad [1.25]$$

gde su: P_f – snaga potrebna za savladavanje otpora kotrljanja [kW], P_v – snaga potrebna za savladavanje otpora vazduha [kW], P_u – snaga potrebna za savladavanje otpora uspona [kW], P_{tr} – snaga potrebna za savladavanje unutrašnjih otpora sistema za prenos snage [kW], P_p – snaga potrebna za savladavanje otpora priključnog vozila [kW], ΣR – suma svih otpora kotrljanju [N], V_i – brzina vozila u pojedinim stepenima prenosa menjača [km/h], η_p – mehanički koeficijent korisnosti transmisije.

U četvrtom koraku koristeći metod Šlipea, potrebno je utvrditi promenu specifične efektivne potrošnje goriva g_e u funkciji od promene broja obrtaja kolenastog vratila motora n_e/n_{Pemax} i u zavisnosti od stepena iskorišćenja snage motora K_p. Specifična efektivna potrošnja goriva g_e, funkcija tri veličine, određuje se primenom izraza [1.26] (Selifonov et al., 2007; Husainov and Selifonov, 2008):

$$g_e = g_{e\max} \times K_n \times K_\eta \quad \left[\frac{g}{kWh}\right] \qquad [1.26]$$

gde je: g_{emax} – vrednost specifične efektivne potrošnje goriva pri maksimalnoj snazi pogonskog agregata [g/kWh], K_n – koeficijent koji uzima u obzir promenu specifične efektivne potrošnje goriva u funkciji od promene broja obrtaja kolenastog vratila n_e/n_{Pemax}, K_η – koeficijent koji uzima u obzir promenu specifične efektivne potrošnje goriva u zavisnosti od stepena iskorišćenja snage motora K_p.

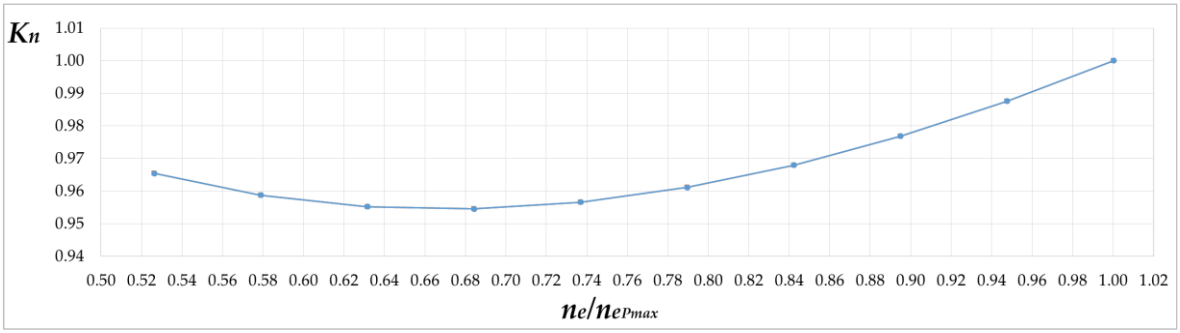
Konačni izrazi za utvrđivanje koeficijenata, K_n i K_η, izvedeni su na osnovu sveobuhvatnih analiza podataka, prikupljenih tokom ispitivanja brzinskih karakteristika postojećih motora u eksploataciji. Prilikom poređenja, metodom određenih vrednosti i vrednosti dobijenih ispitivanjem, moguća su određena odstupanja (Selifonov et al., 2007; Husainov and Selifonov, 2008).

Koeficijent koji uzima u obzir uticaj promene broja obrtaja kolenastog vratila na specifičnu efektivnu potrošnju goriva, predstavlja polinom trećeg stepena i određuje se primenom izraza [1.27]:

$$K_n = 1.25 - 0.99 \times \left(\frac{n_e}{n_{Pe\max}} \right) + 0.98 \times \left(\frac{n_e}{n_{Pe\max}} \right)^2 - 0.24 \times \left(\frac{n_e}{n_{Pe\max}} \right)^3 \qquad [1.27]$$

gde je: n_e – trenutni broj obrtaja kolenastog vratila [o/min], n_{Pemax} – broj obrtaja kolenastog vratila pri maksimalnoj snazi motora [o/min]. Ukoliko se vrednosti izjednače (n_e=n_{Pemax}), koeficijent dostiže vrednost K_n=*1*, koja ukazuje na maksimalnu potrošnju goriva. Izraz [1.28] odgovara za prosečne oto i dizel motore, opremljene sistemom za napajanje gorivom putem direktnog ubrizgavanja.

Zavisnosti promene g_e od promene broja obrtaja kolenastog vratila motora n_e/n_{Pemax}, definisana je koeficijentom K_n. Utvrđivanje odnosa n_e/n_{Pemax} sprovodi se na osnovu podataka preuzetih iz brzinske karakteristike motora pri punom opterećenju, tako što se za određeni opseg broja obrtaja n_e odrede odnosi sa brojem obrtaja pri maksimalnoj snazi motora n_{Pemax}. Dobijeni odnosi n_e/n_{Pemax} koriste se za konstrukciju krive koeficijenta K_n, prikazano na dijagramu (Slika 24).



Slika 24. Zavisnost koeficijenta Kn od promene broja obrtaja motora

Dijagram (Slika 24) na apscisnoj osi sadrži promenu broj obrtaja kolenastog vratila n_e/n_{Pemax}, a na ordinatnoj osi koeficijent K_n. Najmanje vrednosti koeficijent K_n očitavaju se u opsegu promene n_e/n_{Pemax} od 0.66 do 0.70, odnosno opsegu broja obrtaja kolenastog vratila n_e od 1100 do 1400 [o/min]. Najviše vrednosti koeficijenta K_n očitavaju se pri niskim ili veoma visokim brojevima obrtaja, što ukazuje na nepovoljan režim rada motora. Nakon utvrđenih odnosa n_e/n_{Pemax} i vrednosti koeficijenta K_n, za određeni opseg broja obrtaja kolenastog vratila n_e (pri određenoj brzini u datom stepenu prenosa), utvrđuje se stepen iskorišćenja snage motora K_p. Odnos između ukupne snage potrebne za savladavanje svih otpora kretanju P_e' pri određenoj brzini u datom stepenu prenosa i efektivne snage motora P_e pri istoj brzini i stepenu prenosa, definiše stepen iskorišćenja snage motora K_p (Bunčić, 2000). Stepen iskorišćenja snage motora K_p, predstavlja odnos snage potrebne za savladavanje svih otpora kretanju i dostupne snage na pogonskim točkovima u zavisnosti od trenutnog broja obrtaja kolenastog vratila n_e, određen je izrazom [1.28] (Selifonov et al., 2007; Ivković i Spasić, 2023):

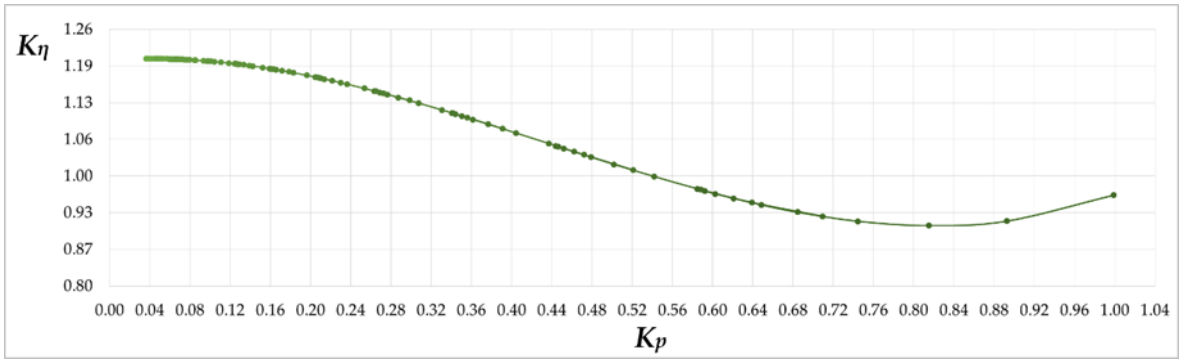
$$K_p = \frac{P_e'}{P_e} = \frac{P_f + P_v + P_u + P_{tr} + P_p}{P_e \times \eta_p} \qquad [1.28]$$

Kada je vrednost $K_p=1$ – sva raspoloživa efektivna snaga (snaga na pogonskim točkovima) se koristi za savladavanje otpora kretanju; $K_p<1$ – višak snage; $K_p>1$ – manjak snage, potrebna je veća efektivna snaga, vozilo ne može održavati konstantnu brzinu. Koeficijent koji uzima u obzir promenu specifične efektivne potrošnje goriva u zavisnosti od stepena iskorišćenja snage motora, predstavlja polinom trećeg stepena, određuje se primenom izraza [1.29]:

$$K_\eta = 1.2 + 0.14 \times \left(\frac{P_\psi + P_v}{P_{e\max} \times \eta_p} \right) - 1{,}8 \times \left(\frac{P_\psi + P_v}{P_{e\max} \times \eta_p} \right)^2 + 1.46 \times \left(\frac{P_\psi + P_v}{P_{e\max} \times \eta_p} \right)^3 \qquad [1.29]$$

gde su: P_{emax} – maksimalna efektivna snaga na izlaznom vratilu motora, P_ψ – snaga potrebna za savladavanje otpora puta [kW] (uključuje snage potrebne za savladavanje otpora puta vučnog i priključnog vozila), P_v – snaga potrebna za savladavanje otpora vazduha [kW] (uključuje snage potrebne za savladavanje otpora vazduha vučnog i priključnog vozila), η_p – ukupni (mehanički) koeficijent korisnosti transmisije. Za uslove kretanja na deonicama trase sa horizontalnom podlogom, tj. ugao nagiba puta $\alpha=0$, važi relacija $P_\psi=P_f$.

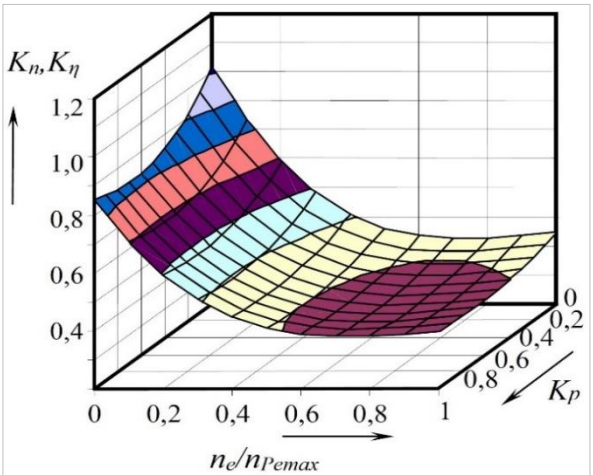
Izraz [1.29] odgovara za prosečne oto i dizel motore, opremljene sistemom za napajanje gorivom putem direktnog ubrizgavanja. Zavisnost koeficijenta K_η od promene stepena iskorišćenja motora prikazana je na dijagramu (Slika 25). Najmanje vrednosti koeficijenta K_η očitavaju se u opsegu promene stepena iskorišćenja K_p od 0,76 do 0,88, tj. u najvišem stepenu prenosa i opsegu broja obrtaja vratila pri maksimalnoj snazi motora. Najviše vrednosti koeficijenta K_η očitavaju se u najnižem stepenu prenosa i niskim brojevima obrtaja, što ukazuje na nepovoljniji režim rada motora i povećanje specifične efektivne potrošnje goriva.



Slika 25. Zavisnost koeficijenta Kη od promene stepena iskorišćenja motora

Krive zavisnosti, koeficijenata K_n i K_η, prikazane na dijagramima (Slika 24 i Slika 25), odgovaraju za skup vozila sa baterijskom nadgradnjom (vučno vozilo opremljeno sa oto motorom, velike radne zapremine, čija je brzinska karakteristika pri punom opterećenju prikazana na dijagramu (Slika 22)) i nagib deonice $u=1{,}492\%$.

Na dijagramu (Slika 26) prikazana je modelirana trodimenzionalna promena, zavisnih promenljivih (K_n i K_η) u odnosu na kombinovani uticaj promene nezavisnih promenljivih (n_e/n_{Pemax} i K_p). Površina dijagrama omogućava jasnu identifikaciju radnih režima u kojima je pogonski agregat ekonomičniji, tj. najmanje vrednosti koeficijenta (K_n i K_η) označene su na dijagramu tamno crvenom površinom i očitavaju se u opsegu promene stepena iskorišćenja K_p od 0,76 do 0,88, odnosno u opsegu promene broja obrtaja n_e/n_{Pemax} od 0,66 do 0,70. Ukoliko vrednosti specifične efektivne potrošnje goriva pri maksimalnoj snazi g_{emax} nisu dostupne, odnosno nisu navedene u karakteristici koja opisuje pogonski agregat (brzinska karakteristika pri punom opterećenju i dr.), moguće je usvojiti orijentacione vrednosti g_{emax} iz literature (Selifonov et al., 2007; Mamontov et. al., 2022).



Slika 26. Zavisnost koeficijenta Kn, Kη u funkciji od promene broja obrtaja i opterećenja motora
(Izvor: Husainov and Selifonov, 2008)

U petom koraku zamenom utvrđenih vrednosti specifične efektivne potrošnje goriva g_e u izraz [1.30], određena je specifična potrošnja goriva g_s. Izraz [1.30] predstavlja zavisnost specifične potrošnje goriva od brzine kretanja i koeficijenta ukupnog otpora puta.

$$g_s = \frac{g_{e\ \max} \times K_n \times K_\eta \times \Sigma\left(R_{vv} + R_{pv}\right)}{36 \times 10^5 \times \eta_P} \quad \left[\frac{kg}{km}\right] \qquad [1.30]$$

Pri kretanju skupa vozila, motor razvija snagu koja je određena veličinama spoljašnjih i unutrašnjih otpora u zavisnosti od uslova kretanja. U slučaju kretanja bez klizanja, jednačina ravnoteže snage (snage motora potrebne za savladavanje svih otpora kretanju koji deluju na skup vozila P_e') može se prikazati izrazom [1.25] (Bunčić, 2000; Selifonov et al., 2007; Ivkovi i Spasić, 2023).

Zavisnost potrošnje goriva po jedninici pređenog puta od brzine kretanja može se prikazati u litrima sagorelog goriva na 100 kilometara pređenog puta korišćenjem izraza [1.31] (Bunčić, 2000; Selifonov et al., 2007; Ivkovic i Spasić, 2023), odnosno u kilogramima sagorelog goriva na 100 kilometara pređenog puta, primenom izraza [1.32]:

$$G_s = \frac{P_e' \times g_e}{10 \times \rho_{fc} \times V_i} \quad \left[\frac{l}{100km}\right] \qquad [1.31]$$

$$G_s = \frac{P_e' \times g_e}{10 \times V_i} \quad \left[\frac{kg}{100km}\right] \qquad [1.32]$$

gde su: G_s – potrošnja goriva izražena u [l/100km], odnosno u [kg/100km] po jedinici pređenog puta, V_i – brzina vozila u pojedinim stepenima prenosa menjača izražena u [km/h], G_s – potrošnja goriva izražena u [l/100km], ρ_{fc} – gustina goriva izražena u [kg/m^3].

Zamenom izraza [1.26] u izraz [1.32], dobija se zavisnost potrošnje po jedinici pređenog puta od brzine kretanja i koeficijenta ukupnog otpora puta.

$$G_s = \frac{g_e \times \Sigma\left(R_{vv} + R_{pv}\right)}{36 \times 10^3 \times \eta_p} = \frac{g_e \times \Sigma\left(R_f + R_v + R_u + R_{tr} + R_p\right)}{36 \times 10^3 \times \eta_p} \qquad \left[\frac{kg}{100km}\right] \qquad [1.33]$$

Iz izraza [1.33] sledi da sa povećanjem ukupnih otpora kretanju skupa vozila $\Sigma(R_{vv} + R_{pv})$ raste i potrošnja goriva, odnosno da je potrošnja goriva po jedinici puta manja ukoliko je pogonski agregat ekonomičniji, tj. ima manju specifičnu efektivnu potrošnju goriva. Zamenom izraza [1.30] u izraz [1.33], dobija se osnova za konstrukciju karakteristike ekonomičnosti potrošnje. Izraz [1.34] prikazuje zavisnost potrošnje goriva po jedinici pređenog puta od brzine kretanja i koeficijenta ukupnog otpora puta, tj. odgovara za uslove kretanja konstantnom brzinom po putu sa stalnim koeficijentom otpora puta.

$$G_s = \frac{K_n \times K_\eta \times g_{e\max} \times \Sigma\left(R_{vv} + R_{pv}\right)}{36 \times 10^3 \times \eta_p} \qquad \left[\frac{kg}{100km}\right] \qquad [1.34]$$

U šestom koraku, nakon određenih vredosti specifične potrošnje goriva g_s [1.30], primenom regresione analize R_a, utvrđena je funkcionalna zavisnost specifične potrošnje g_s i brzine kretanja skupa vozila, primenom izraza [1.35]:

$$g_s^{\,Ra} = a + b \times V + c \times V^2 \qquad \left[\frac{kg}{km}\right] \qquad [1.35]$$

gde su: $g_s^{\,Ra}$ – specifična potrošnja goriva utvrđena regresionom analizom [kg/km], V – brzina kretanja skupa vozila [km/h], regresioni koeficijenti: a – konstanta, predstavlja osnovnu vrednost kada je $V=0$, b – linearni koeficijent, pokazuje koliko se vrednost zavisne promenljive $g_s\,(R_a)$ menja sa promenom V u linearnom obliku; c – kvadratni koeficijent, pokazuje koliko se vrednost zavisne promenljive $g_s^{\,Ra}$ menja sa promenom V u nelinearnom obliku (promena brzine, rast ili smanjenje).

Izraz [1.35] predstavlja kvadratnu (polinomsku) regresiju, koja za konkretan slučaj uključuje jednu zavisnu promenljivu $g_s^{\,Ra}$ i jednu nezavisnu promenljivu V, i predstavlja specifičan oblik nelinearne regresije. Regresiona analiza predstavlja skup statističkih podataka za procenu odnosa između jedne zavisne promenljive i jedne ili više nezavisnih promenljivih (Jerosimić, 2019). Osnovni cilj regresione analize je identifikacija i kvantifikacija veza između promenljivih, tj. predviđanje vrednosti zavisne promenljive g_s i analiza uticaja pojedinih nezavisnih promenljivih V na zavisnu promenljivu.

Analiza je sprovedena za različite sastave vučnih i priključnih vozila na odabranim deonicama trase, pri čemu su uzeti u obzir uticaji koji potiču od uslova eksploatacije i eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila na promenu regresionih koeficijenata. Poput, transportnih uslova (odlazak punih vozila i povratak praznih vozila), putnih uslova (promene nagiba koje se javljaju na deonicama pri odlasku na mesto istovara, odnosno povratku na mesto utovara robe), kao i eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila (tip nadgradnje, radni pritisci, vrsta goriva i dr.). Razmatrana je trasa sa ponavljajućim itinererom, prevoznim putem, koja je na celoj dužini uglavnom dvotračna, po jedna traka za svaki smer kretanja, i u određenim

slučajevima sa dodatnom preticajnom trakom. Prema funkcionalnoj klasifikaciji puteva, trasa obuhvata magistralne, regionalne i lokalne puteve. Vrednosti promene procentualnog nagiba u odlasku i povratku na trasi, tj. njenim deonicama, prikazane su kao iste apsolutne vrednosti ali suprotnog predznaka. Vrednosti procentualnog nagiba deonica, određene su primenom izraza [1.7]. Regresionom analizom, na svakoj deonici trase u odlasku i povratku, utvrđen je 431 različiti odnos specifične potrošnje goriva i prosečne eksploatacione brzine vozila.

U Tabelama 28 i 29., (Vašalić i ostali, 2024; Vašalić i ostali, 2025), prikazan je deo utvrđenih regresionih koeficijenata na trasi Pančevo–Prahovo. Vrednosti deonica trase određene su slučajnim odabirom. Utvrđeni regresioni koeficijenti odgovaraju za deo skupova vozila, dat u Tabeli 24. Regresioni kod za povezivanje podataka između dozvoljenih brzina kretanja i vrednosti nagiba na razmatranim deonicama (u odlasku na mesto istovara robe i povratku u na mesto utovara robe) trase sa metodom određivanja potrošnje goriva primenom podataka iz brzinske karakteristike motora, dat je u prilogu rada (Prilog 2).

Tabela 28. Utvrđene vrednosti regresionih koeficijenata za skup vozila sa baterijskom nadgradnjom i pogonom na dizel gorivo

Deonica trase	Nagib odlazak %	Nagib povratak %	*BC dizel VI + (ST) (Tip-1)*					
			Regresioni koeficijenti odlazak			Regresioni koeficijenti povratak		
			a	b	c	a	b	c
7	0,021	0,033	1,2894E-01	2,0382E-03	-5,0850E-06	1,1534E-01	2,0492E-03	-6,5544E-06
8	-0,060	-0,098	1,2611E-01	2,4236E-03	-9,9910E-06	1,1269E-01	2,4146E-03	-1,1280E-05
9	0,025	0,002	1,2375E-01	2,7753E-03	-1,4555E-05	1,1054E-01	2,7432E-03	-1,5614E-05
10	0,033	0,214	1,2183E-01	3,0907E-03	-1,8694E-05	1,0883E-01	3,0336E-03	-1,9487E-05
11	-0,015	0,386	1,2035E-01	3,3658E-03	-2,2331E-05	1,0756E-01	3,2828E-03	-2,2837E-05
12	-0,037	-0,394	1,1921E-01	3,6176E-03	-2,5731E-05	1,0661E-01	3,5102E-03	-2,5971E-05
13	0,200	1,879	1,1842E-01	3,8421E-03	-2,8834E-05	1,0601E-01	3,7097E-03	-2,8794E-05
14	-0,426	1,236	1,1712E-01	4,1304E-03	-3,3084E-05	1,0489E-01	3,9734E-03	-3,2759E-05
15	0,192	0,500	1,1638E-01	4,3651E-03	-3,6641E-05	1,0432E-01	4,1840E-03	-3,6032E-05
16	-0,064	0,287	1,1618E-01	4,5462E-03	-3,9479E-05	1,0426E-01	4,3422E-03	-3,8597E-05
17	-0,223	-0,580	1,1653E-01	4,6806E-03	-4,1756E-05	1,0474E-01	4,4548E-03	-4,0615E-05
18	0,167	0,546	1,1822E-01	4,6800E-03	-4,2037E-05	1,0655E-01	4,4328E-03	-4,0635E-05
19	-0,287	1,901	1,1998E-01	4,6782E-03	-4,2346E-05	1,0841E-01	4,4111E-03	-4,0696E-05
20	-0,527	0,238	1,2182E-01	4,6703E-03	-4,2588E-05	1,1032E-01	4,3848E-03	-4,0704E-05
21	-0,368	-0,118	1,2375E-01	4,6516E-03	-4,2672E-05	1,1230E-01	4,3498E-03	-4,0577E-05
22	0,106	3,417	1,2590E-01	4,6184E-03	-4,2623E-05	1,1449E-01	4,3009E-03	-4,0326E-05
23	0,575	1,624	1,2827E-01	4,5680E-03	-4,2376E-05	1,1688E-01	4,2356E-03	-3,9882E-05
24	0,105	3,050	1,3076E-01	4,5086E-03	-4,2044E-05	1,1937E-01	4,1634E-03	-3,9372E-05
25	0,095	0,294	1,3332E-01	4,4443E-03	-4,1659E-05	1,2190E-01	4,0879E-03	-3,8828E-05
26	-0,164	-0,140	1,3596E-01	4,3736E-03	-4,1201E-05	1,2449E-01	4,0082E-03	-3,8233E-05
27	0,632	1,016	1,3885E-01	4,2848E-03	-4,0552E-05	1,2731E-01	3,9109E-03	-3,7456E-05
28	0,267	0,449	1,4186E-01	4,1820E-03	-3,9707E-05	1,3025E-01	3,8008E-03	-3,6494E-05
29	-0,067	-0,649	1,4502E-01	4,0691E-03	-3,8764E-05	1,3331E-01	3,6825E-03	-3,5455E-05
30	-0,054	-1,089	1,4822E-01	3,9507E-03	-3,7742E-05	1,3638E-01	3,5607E-03	-3,4358E-05
31	0,036	-1,133	1,5147E-01	3,8292E-03	-3,6687E-05	1,3948E-01	3,4377E-03	-3,3251E-05
32	0,053	1,876	1,5494E-01	3,6864E-03	-3,5348E-05	1,4279E-01	3,2940E-03	-3,1871E-05
33	-0,088	-1,103	1,5842E-01	3,5430E-03	-3,4019E-05	1,4611E-01	3,1501E-03	-3,0498E-05
34	0,640	-0,329	1,6203E-01	3,3909E-03	-3,2604E-05	1,4954E-01	2,9993E-03	-2,9061E-05
35	0,289	-1,647	1,6567E-01	3,2331E-03	-3,1093E-05	1,5296E-01	2,8448E-03	-2,7550E-05
36	-0,014	2,144	1,6931E-01	3,0687E-03	-2,9440E-05	1,5638E-01	2,6856E-03	-2,5927E-05
37	-0,076	-0,433	1,7309E-01	2,8947E-03	-2,7696E-05	1,5993E-01	2,5170E-03	-2,4213E-05
38	0,134	-5,909	1,7681E-01	2,7269E-03	-2,6047E-05	1,6342E-01	2,3540E-03	-2,2579E-05
39	-0,104	0,184	1,8063E-01	2,5530E-03	-2,4347E-05	1,6699E-01	2,1867E-03	-2,0914E-05
40	0,080	-3,492	1,8446E-01	2,3726E-03	-2,2514E-05	1,7054E-01	2,0148E-03	-1,9141E-05
41	-0,310	-1,018	1,8828E-01	2,1938E-03	-2,0710E-05	1,7407E-01	1,8461E-03	-1,7417E-05
42	-0,189	0,991	1,9222E-01	2,0064E-03	-1,8825E-05	1,7772E-01	1,6690E-03	-1,5614E-05
43	0,263	-0,756	1,9605E-01	1,8183E-03	-1,6850E-05	1,8127E-01	1,4903E-03	-1,3703E-05
44	0,056	1,382	1,9992E-01	1,6297E-03	-1,4894E-05	1,8483E-01	1,3126E-03	-1,1831E-05
45	-0,081	-1,175	2,0375E-01	1,4340E-03	-1,2760E-05	1,8834E-01	1,1300E-03	-9,8118E-06
46	-0,135	-0,006	2,0747E-01	1,2339E-03	-1,0449E-05	1,9173E-01	9,4492E-04	-7,6456E-06
47	-1,492	-0,453	2,1115E-01	1,0418E-03	-8,2754E-06	1,9508E-01	7,6747E-04	-5,6128E-06

48	-0,192	0,404	2,1473E-01	8,6201E-04	-6,2795E-06	1,9831E-01	6,0262E-04	-3,7591E-06
49	0,080	0,013	2,1811E-01	6,9999E-04	-4,5462E-06	2,0139E-01	4,5212E-04	-2,1062E-06
50	0,011	-0,007	2,2142E-01	5,2727E-04	-2,5298E-06	2,0437E-01	2,9348E-04	-2,0970E-07
51	-0,628	0,148	2,2456E-01	3,4789E-04	-2,4296E-07	2,0716E-01	1,3053E-04	1,9177E-06

Tabela 29. Utvrđene vrednosti regresionih koeficijenata za skup vozila sa baterijskom nadgradnjom i pogonom na komprimovani prirodni gas

Deonica trase	Nagib odlazak %	Nagib povratak %	BC_{KPG} + (ST) (Tip-1)					
			Regresioni koeficijenti odlazak			Regresioni koeficijenti povratak		
			a	b	c	a	b	c
7	0,021	0,033	1,9618E-01	3,0007E-03	-7,6544E-06	1,7578E-01	3,0253E-03	-9,8905E-06
8	-0,060	-0,098	1,9226E-01	3,5455E-03	-1,4551E-05	1,7212E-01	3,5423E-03	-1,6548E-05
9	0,025	0,002	1,8901E-01	4,0403E-03	-2,0917E-05	1,6914E-01	4,0051E-03	-2,2604E-05
10	0,033	0,214	1,8633E-01	4,4851E-03	-2,6680E-05	1,6678E-01	4,4145E-03	-2,8003E-05
11	-0,015	0,386	1,8428E-01	4,8733E-03	-3,1719E-05	1,6503E-01	4,7654E-03	-3,2644E-05
12	-0,037	-0,394	1,8261E-01	5,2415E-03	-3,6652E-05	1,6365E-01	5,0975E-03	-3,7186E-05
13	0,200	1,879	1,8147E-01	5,5648E-03	-4,1041E-05	1,6280E-01	5,3842E-03	-4,1171E-05
14	-0,426	1,236	1,7942E-01	6,0006E-03	-4,7414E-05	1,6102E-01	5,7834E-03	-4,7128E-05
15	0,192	0,500	1,7821E-01	6,3580E-03	-5,2775E-05	1,6006E-01	6,1045E-03	-5,2067E-05
16	-0,064	0,287	1,7778E-01	6,6383E-03	-5,7126E-05	1,5986E-01	6,3499E-03	-5,6003E-05
17	-0,223	-0,580	1,7817E-01	6,8498E-03	-6,0653E-05	1,6047E-01	6,5276E-03	-5,9133E-05
18	0,167	0,546	1,8068E-01	6,8430E-03	-6,0913E-05	1,6316E-01	6,4885E-03	-5,9002E-05
19	-0,287	1,901	1,8323E-01	6,8406E-03	-6,1301E-05	1,6588E-01	6,4556E-03	-5,9016E-05
20	-0,527	0,238	1,8585E-01	6,8364E-03	-6,1705E-05	1,6862E-01	6,4228E-03	-5,9061E-05
21	-0,368	-0,118	1,8859E-01	6,8213E-03	-6,1972E-05	1,7145E-01	6,3818E-03	-5,8998E-05
22	0,106	3,417	1,9165E-01	6,7856E-03	-6,2057E-05	1,7459E-01	6,3212E-03	-5,8763E-05
23	0,575	1,624	1,9506E-01	6,7159E-03	-6,1697E-05	1,7806E-01	6,2281E-03	-5,8093E-05
24	0,105	3,050	1,9864E-01	6,6375E-03	-6,1287E-05	1,8165E-01	6,1295E-03	-5,7410E-05
25	0,095	0,294	2,0231E-01	6,5536E-03	-6,0826E-05	1,8529E-01	6,0277E-03	-5,6702E-05
26	-0,164	-0,140	2,0610E-01	6,4611E-03	-6,0274E-05	1,8901E-01	5,9206E-03	-5,5935E-05
27	0,632	1,016	2,1024E-01	6,3428E-03	-5,9457E-05	1,9308E-01	5,7882E-03	-5,4911E-05
28	0,267	0,449	2,1455E-01	6,2031E-03	-5,8330E-05	1,9731E-01	5,6353E-03	-5,3579E-05
29	-0,067	-0,649	2,1908E-01	6,0494E-03	-5,7075E-05	2,0171E-01	5,4716E-03	-5,2154E-05
30	-0,054	-1,089	2,2370E-01	5,8875E-03	-5,5709E-05	2,0615E-01	5,3037E-03	-5,0670E-05
31	0,036	-1,133	2,2839E-01	5,7204E-03	-5,4294E-05	2,1063E-01	5,1335E-03	-4,9169E-05
32	0,053	1,876	2,3339E-01	5,5257E-03	-5,2538E-05	2,1542E-01	4,9362E-03	-4,7334E-05
33	-0,088	-1,103	2,3840E-01	5,3289E-03	-5,0760E-05	2,2021E-01	4,7355E-03	-4,5446E-05
34	0,640	-0,329	2,4361E-01	5,1179E-03	-4,8841E-05	2,2517E-01	4,5241E-03	-4,3458E-05
35	0,289	-1,647	2,4893E-01	4,8925E-03	-4,6692E-05	2,3017E-01	4,3038E-03	-4,1317E-05
36	-0,014	2,144	2,5424E-01	4,6614E-03	-4,4420E-05	2,3515E-01	4,0801E-03	-3,9082E-05
37	-0,076	-0,433	2,5978E-01	4,4146E-03	-4,1997E-05	2,4035E-01	3,8409E-03	-3,6697E-05
38	0,134	-5,909	2,6516E-01	4,1833E-03	-3,9804E-05	2,4542E-01	3,6128E-03	-3,4463E-05
39	-0,104	0,184	2,7072E-01	3,9395E-03	-3,7490E-05	2,5062E-01	3,3760E-03	-3,2152E-05
40	0,080	-3,492	2,7642E-01	3,6702E-03	-3,4730E-05	2,5590E-01	3,1218E-03	-2,9517E-05
41	-0,310	-1,018	2,8211E-01	3,4042E-03	-3,2032E-05	2,6114E-01	2,8728E-03	-2,6967E-05
42	-0,189	0,991	2,8798E-01	3,1267E-03	-2,9230E-05	2,6657E-01	2,6121E-03	-2,4311E-05
43	0,263	-0,756	2,9345E-01	2,8761E-03	-2,6754E-05	2,7166E-01	2,3691E-03	-2,1823E-05
44	0,056	1,382	2,9906E-01	2,6171E-03	-2,4206E-05	2,7684E-01	2,1222E-03	-1,9319E-05
45	-0,081	-1,175	3,0488E-01	2,3142E-03	-2,0857E-05	2,8214E-01	1,8435E-03	-1,6207E-05
46	-0,135	-0,006	3,1048E-01	2,0147E-03	-1,7421E-05	2,8721E-01	1,5690E-03	-1,3020E-05
47	-1,492	-0,453	3,1604E-01	1,7253E-03	-1,4167E-05	2,9225E-01	1,3041E-03	-1,0008E-05
48	-0,192	0,404	3,2140E-01	1,4586E-03	-1,1237E-05	2,9710E-01	1,0608E-03	-7,3001E-06
49	0,080	0,013	3,2620E-01	1,2562E-03	-9,3418E-06	3,0149E-01	8,6669E-04	-5,3636E-06
50	0,011	-0,007	3,3138E-01	9,7343E-04	-5,9800E-06	3,0611E-01	6,1170E-04	-2,2751E-06
51	-0,628	0,148	3,3619E-01	6,9808E-04	-2,5106E-06	3,1038E-01	3,6409E-04	9,2034E-07

Primenom utvrđenih regresionih koeficijenata navedenih u Tabelama 28 i 29 i prosečnih vrednosti eksploatacione brzine moguće je odrediti specifičnu potrošnju goriva razmatranih skupova vozila na trasi transporta, tj. njenim deonicama. U narednim odeljcima rada navedeni su rezultati metode i zaključna razmatranja.

4.4.1.3 Rezultati metode

U ovom pododeljku rada prikazani su rezultati dobijeni primenom metode određivanja potrošnje goriva zasnovane na podacima brzinske karakteristike motora. U cilju određivanja specifične potrošnje goriva različitih skupova vozila u funkciji od eksploatacione brzine kretanja, primenom utvrđenih regresionih koeficijenata i korektivnih faktora, određena je specifična potrošnja goriva skupova vozila na njenim deonicama. Rezultati metode za skupove vozila BC $_{\text{dizel VI}}$ + (ST) (Tip–4); BC $_{\text{dizel VI}}$ + (ST) (Tip–1); BC $_{\text{KPG}}$ + (ST) (Tip–4); BC $_{\text{KPG}}$ + (ST) (Tip–1) su prikazani u Tabeli 30, odnosno za skupove vozila BC $_{\text{dizel IV}}$ + (ST) (Tip –4); BC $_{\text{dizel IV}}$ + (ST) (Tip–1); BA $_{\text{KPG}}$ Tip–4 + (T) (Tip–4); BA $_{\text{KPG}}$ Tip–1 + (T) (Tip–1), dijagramski na Slikama 27 do 30.

U Tabeli 30 navedeni su rezultati određene specifične potrošnje goriva u odlasku i dolasku i deo ulaznih parametara koji opisuju: uticaje putnih uslova (koeficijente otpora kotrljanju vučnih vozila za pogonske točkove f_p i za vođene točkove f_v), klimatskih uslova (vrednosti gustine vazduha ρ_v i srednje temperature vazduha t), odnosno vrednosti zapreminskih masa razmatranih pogonskih goriva. Pored navedenog, prikazani su ulazni parametri koji pripadaju transportnim uslovima, a koji opisuju međuzavisnost eksploatacione–tehničkih karakteristika vozila i klimatskih uslova (ukupna zapremina posuda V^n, radni pritisak posuda P^n i faktor kompresibilnosti gasa $Z_{P,T}$ za odgovarajuće vrednosti pritiska i temperature). Određena potrošnja goriva prikazana je kao količina sagorelog goriva po jedinici pređenog puta na određenim deonicama trase u odlasku (vozila pod punim opterećenjem) $g_{s\ opt}$ i povratku (prazna vozila) $g_{s\ neopt}$.

Tabela 30. Rezultati metode određivanja potrošnje goriva primenom podataka iz brzinske karakteristike motora

Usvojene vrednosti ulaznih parametara

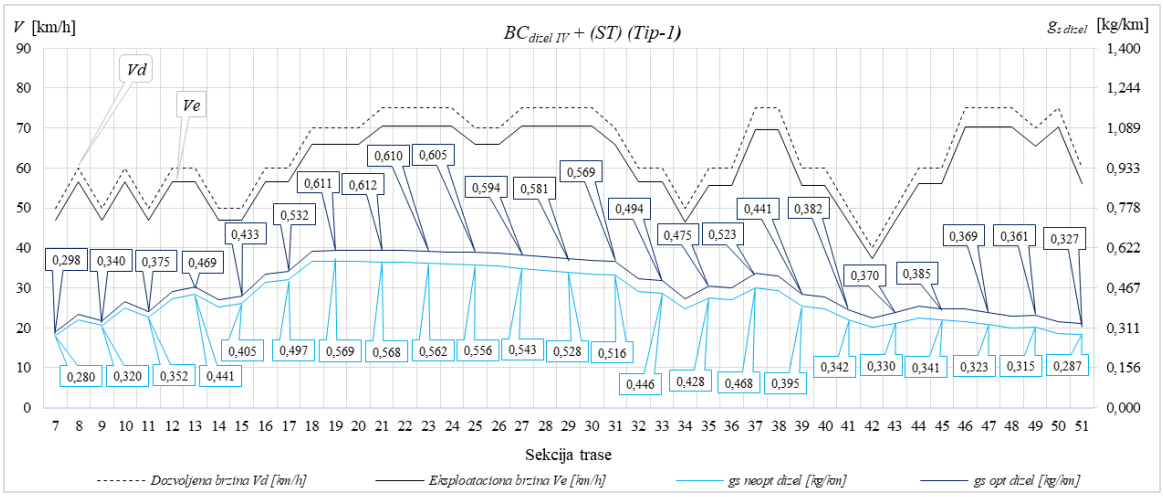
Oznaka	Vrednost	Jedinica	Referenca	Oznaka	Vrednost	Jedinica	Referenca
f_{ov}	0,006	-	*Poglavlje 4,3*	V^n *Tip-4*	39990	dm³	*Poglavlje 4,2*
f_{op}	0,007	-	*Poglavlje 4,3*	P^n *Tip-4*	250	MPa	*Poglavlje 4,2*
ρ_v	1,222	kg/m³	*Poglavlje 4,2*	$Z_{P,T}$	0,841	-	*Poglavlje 6/Prilog 3*
t	15	°C	*Poglavlje 4,2*	V^n *Tip-1*	22350	dm³	*Poglavlje 4,2*
$\rho_{fc\ dizel}$	0,835	kg/l	*Poglavlje 3,2*	P^n *Tip-1*	200	MPa	*Poglavlje 4,2*
$\rho_{fc\ KPG}$	0,72	kg/m³	*Poglavlje 3,2*	$Z_{P,T}$	0,798	-	*Poglavlje 6/Prilog 3*

Deonica trase	Eksploatacio na brzina V_e [km/h]	BC $_{\text{dizel VI}}$ + (ST) (Tip-4)		BC $_{\text{dizel VI}}$ + (ST) (Tip-1)		BC $_{\text{KPG}}$ + (ST) (Tip-4)		BC $_{\text{KPG}}$ + (ST) (Tip-1)	
		Odlazak	Povratak	Odlazak	Povratak	Odlazak	Povratak	Odlazak	Povratak
		$g_{s\ opt\ dizel}$ [kg/km]	$g_{s\ neopt\ dizel}$ [kg/km]	$g_{s\ opt\ dizel}$ [kg/km]	$g_{s\ neopt\ dizel}$ [kg/km]	$g_{s\ opt\ KPG}$ [kg/km]	$g_{s\ neopt\ KPG}$ [kg/km]	$g_{s\ opt\ KPG}$ [kg/km]	$g_{s\ neopt\ KPG}$ [kg/km]
7	47,033880	0,221719	0,190913	0,226598	0,213410	0,291250	0,251474	0,297523	0,280549
8	56,440656	0,269109	0,234755	0,274467	0,259929	0,351610	0,307577	0,358444	0,339878
9	47,033880	0,250831	0,216122	0,256319	0,241481	0,327308	0,282801	0,334320	0,315343
10	56,440656	0,303055	0,263165	0,309304	0,292370	0,393548	0,342744	0,401475	0,379969
11	47,033880	0,274659	0,235416	0,280892	0,264060	0,356766	0,306657	0,364704	0,343253
12	56,440656	0,330417	0,284782	0,337620	0,318138	0,427718	0,369709	0,436849	0,412134
13	56,440656	0,342340	0,293865	0,350021	0,329268	0,442917	0,381266	0,452664	0,426312
14	47,033880	0,306543	0,260725	0,313880	0,294109	0,397821	0,339282	0,407180	0,381948
15	47,033880	0,316561	0,268587	0,324266	0,303518	0,411101	0,349739	0,420945	0,394428
16	56,440656	0,380095	0,323442	0,389177	0,364711	0,493105	0,420722	0,504699	0,473458
17	56,440656	0,387941	0,328787	0,397457	0,371843	0,503751	0,428025	0,515928	0,483147
18	65,847432	0,443043	0,374336	0,454103	0,424340	0,574161	0,486256	0,588312	0,550230
19	65,847432	0,444297	0,372813	0,455848	0,424793	0,575745	0,484152	0,590551	0,550747
20	65,847432	0,445241	0,371158	0,457253	0,424985	0,577312	0,482211	0,592741	0,551299
21	70,550820	0,444708	0,368811	0,457043	0,423926	0,576941	0,479339	0,592817	0,550203

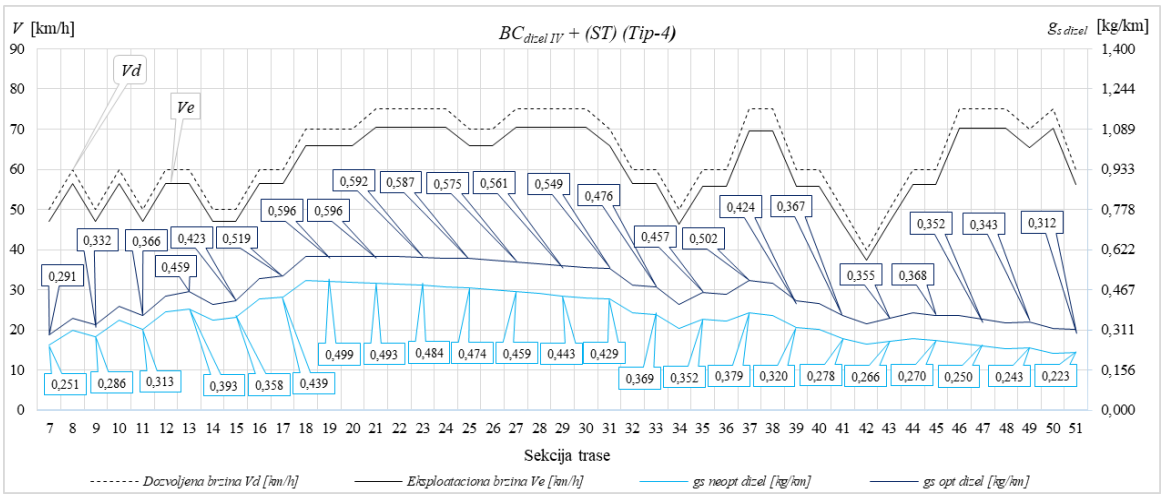
22	70,550820	0,444108	0,365936	0,456855	0,422660	0,576844	0,476097	0,593289	0,549186
23	70,550820	0,442502	0,362162	0,455646	0,420416	0,574981	0,471276	0,591971	0,546448
24	70,550820	0,440435	0,358172	0,453934	0,417779	0,572777	0,466456	0,590248	0,543471
25	65,847432	0,439772	0,355427	0,453654	0,416500	0,572746	0,463560	0,590739	0,542596
26	65,847432	0,437360	0,351591	0,451509	0,413662	0,570225	0,459047	0,588589	0,539483
27	70,550820	0,431802	0,345051	0,446146	0,407799	0,563462	0,450867	0,582105	0,532283
28	70,550820	0,427280	0,339350	0,441856	0,402912	0,558204	0,443835	0,577199	0,526474
29	70,550820	0,422229	0,333365	0,436995	0,397567	0,552328	0,436527	0,571611	0,520148
30	70,550820	0,416876	0,327312	0,431789	0,391988	0,546093	0,429269	0,565583	0,513593
31	65,847432	0,414773	0,324362	0,429852	0,389625	0,544183	0,426160	0,563899	0,511322
32	56,440656	0,365550	0,285173	0,378973	0,343175	0,480587	0,375550	0,498151	0,451323
33	56,440656	0,360655	0,279945	0,374160	0,338160	0,474850	0,369132	0,492572	0,445351
34	46,379756	0,310260	0,241006	0,321853	0,290952	0,409027	0,318236	0,424253	0,383686
35	55,655707	0,347367	0,267233	0,360817	0,324989	0,458497	0,353348	0,476177	0,429102
36	55,655707	0,341634	0,261738	0,355062	0,319305	0,451616	0,346712	0,469273	0,422272
37	69,569634	0,383030	0,289425	0,398816	0,356815	0,507541	0,384402	0,528337	0,473025
38	69,569634	0,374591	0,281381	0,390343	0,348453	0,497497	0,374453	0,518336	0,462948
39	55,655707	0,323564	0,244462	0,336922	0,301392	0,429931	0,325449	0,447615	0,400604
40	55,655707	0,317151	0,238594	0,330434	0,295114	0,421585	0,317981	0,439130	0,392496
41	46,379756	0,280849	0,212766	0,292344	0,261768	0,372965	0,283416	0,388095	0,347857
42	37,434671	0,257140	0,196625	0,267334	0,240203	0,341042	0,261649	0,354417	0,318820
43	46,793339	0,271961	0,204455	0,283388	0,253011	0,362436	0,273294	0,377543	0,337394
44	56,152007	0,291323	0,215263	0,304255	0,269915	0,390238	0,289197	0,407451	0,361762
45	56,152007	0,284008	0,208965	0,296781	0,262871	0,380299	0,280953	0,397222	0,352302
46	70,190008	0,283669	0,203348	0,297410	0,260974	0,381685	0,275269	0,399888	0,351618
47	70,190008	0,274019	0,195308	0,287496	0,251766	0,369037	0,264956	0,386840	0,339629
48	70,190008	0,265141	0,188066	0,278349	0,243340	0,357583	0,255728	0,375011	0,328799
49	65,510675	0,267884	0,190628	0,281129	0,246024	0,363003	0,260010	0,380662	0,333858
50	70,190008	0,248582	0,174276	0,261360	0,227517	0,336781	0,238252	0,353698	0,308875
51	56,152007	0,243179	0,175087	0,254835	0,223930	0,327566	0,237727	0,342911	0,302202
Prosečna potrošnja goriva na selektovanim deonicama trase		0,345983	0,275648	0,357657	0,326477	0,454370	0,362684	0,469599	0,428929

U nastavku, na Slikama 27, 28, 29, 30 i 31, prikazani su rezultati određene potrošnje goriva za skupove vozila $BC_{dizel\ IV}$ + (ST) (Tip –4) i $BC_{dizel\ IV}$ + (ST) (Tip–1) sa pogonom na dizel gorivo i starijim tehnologijama tretmana izduvnih gasova), kao i za skupove vozila, kamione i prikolice sa pogonom na komprimovani prirodni gas BA_{KPG} (Tip–4) + (T) (Tip–4) i BA_{KPG} (Tip–1) + (T) (Tip–1). Na apscisnim osama dijagrama (Slike 27, 28, 29 i 30) prikazane su deonice trase, dok su na ordinatnim osama prikazane brzine kretanja i specifična potrošnja goriva. Krive promene specifične potrošnje goriva po deonicama trase u zavisnosti od eksploatacione brzine vozila, označene su dvobojno, dok su vrednosti dozvoljene brzine i eksploatacione brzine označene crnom ispekidanom, odnosno crnom punom linijom.

Na slikama 27 i 28, kao i u Tabeli 30., primetna je razlika u smanjenju ukupne prosečne potrošnje goriva u povratku u odnosu na odlazak, razmatranih skupova vozila. Pre svega, primetan je uticaj ukupne mase skupa vozila, kao i konfiguracija terena (nagibi na trasi u odlasku i povratku). Takođe, za oba smera, primetni su uticaji korektivnih faktora na povećanje potrošnje goriva sa kojima su obuhvaćeni međusobni uticaji vozila u saobraćajnom toku, način upravljanja vozilom i dr. U slučaju skupova vozila sa pogonom na dizel gorivo i starijim tehnologijama tretmana izduvnih gasova, prikazano na Slikama 27 i 28., krive promene specifične potrošnje goriva u odlasku (vozila pod punim opterećenjem) $g_{s\ opt}$ i povratku (prazna vozila) $g_{s\ neopt}$, označene su tamno plavom, odnosno svetlopavom bojom.

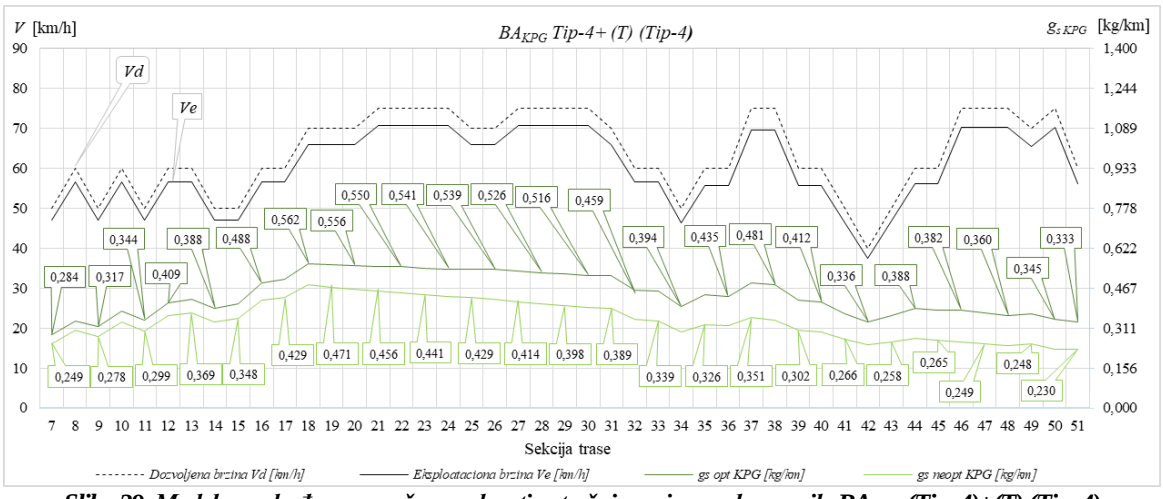


Slika 27. Modelom određene prosečne vrednosti potrošnje goriva za skup vozila BC dizel IV + (ST) (Tip–4)

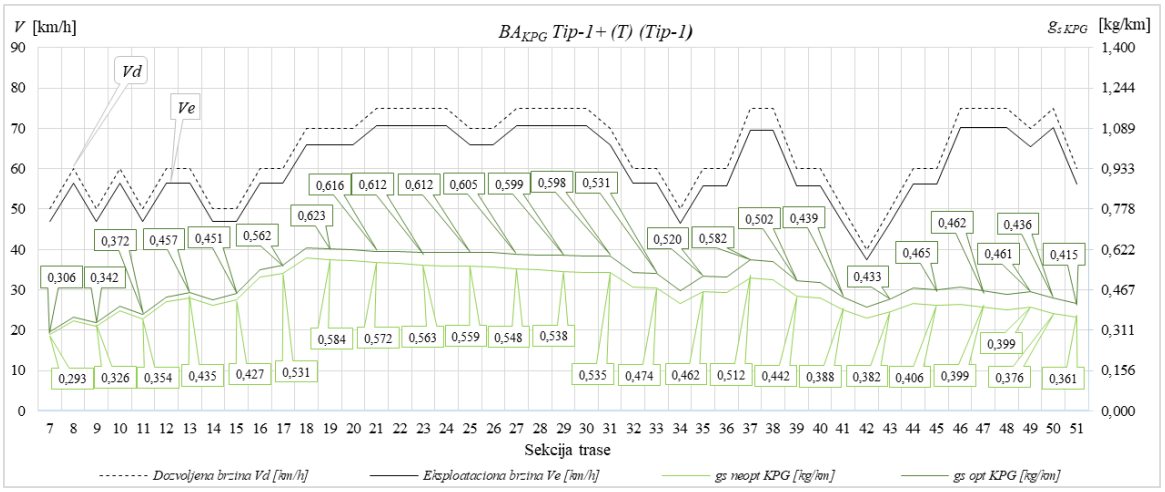


Slika 28. Modelom određene prosečne vrednosti potrošnje goriva za skup vozila BC dizel IV + (ST) (Tip–4)

U slučaju skupova vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas, kamioni i prikolice, prikazano na slikama 29 i 30, krive promene specifične potrošnje goriva za oba smera, u odlasku $g_{s\ opt}$ i povratku $g_{s\ neopt}$, označene su tamno zelenom, odnosno svetlozelenom bojom.

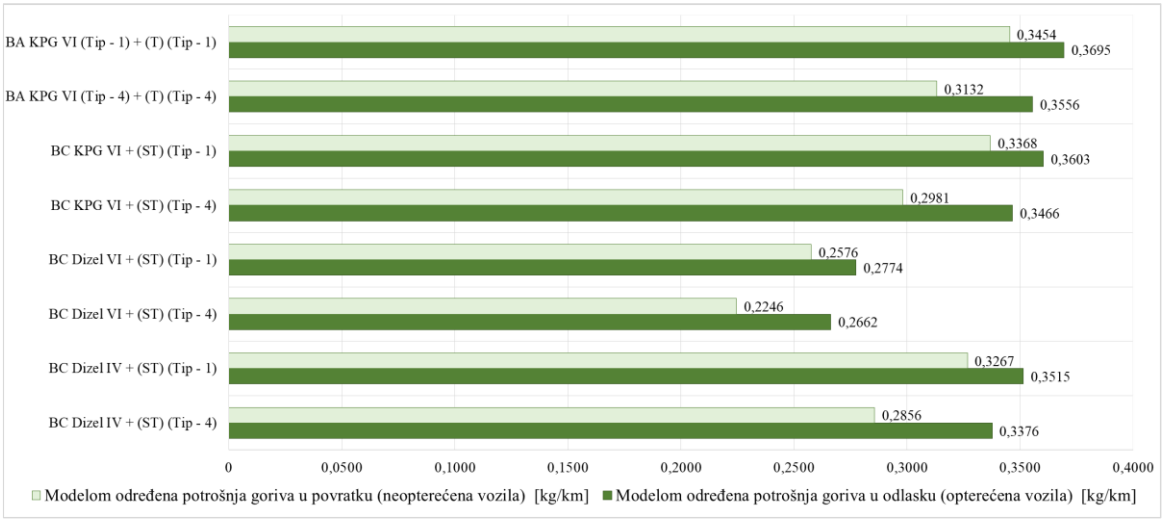


Slika 29. Modelom određene prosečne vrednosti potrošnje goriva za skup vozila BA KPG (Tip–4)+(T) (Tip–4)



Slika 30. Modelom određene prosečne vrednosti potrošnje goriva za skup vozila BA$_{KPG}$ (Tip–1)+(T) (Tip–1)

Na Slici 31. prikazane su vrednosti prosečne potrošnje goriva u odlasku i povratku, određene primenom metode Šlipea za skupove vozila navedene u Tabeli 24.



Slika 31. Modelom određene prosečne vrednosti potrošnje goriva za oba smera

4.4.1.4 Zaključna razmatranja

Metoda Šlipea vrednosti specifične efektivne potrošnje goriva za pun radni opseg motora predstavlja kao funkciju tri veličine. Drugim rečima, predstavlja promenu specifične efektivne potrošnju od stepena iskorišćenja snage motora i broja obrtaja kolenastog vratila (tj. uzima u obzir odnos između snage potrebne za savladavanje svih otpora kretanju i snage dostupne na pogonskim točkovima, kao i uticaj promene broja obrtaja kolenastog vratila na specifičnu efektivnu potrošnju goriva). Na taj način ova metoda omogućava modeliranje promene prosečne specifične potrošnje goriva i jasan uvid u odnos između opterećenja motora i broja obrtaja kolenastog vratila. Model procene potrošnje goriva, kao i prezentovana metoda, pored uticaja koji proizilaze od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, poput: vrste pogonskog agregata, vrste goriva, tipa nadgradnje i dr., uzimaju u obzir i uticaje koji proizilaze od uslova eksploatacije. Iako je postavka metode zasnovana na ravnomernom kretanju, promena režima kretanja vozila aproksimirana je određivanjem eksploatacione brzine

vozila za svaku deonicu trase. Navedenim postupkom obuhvaćen je deo uticaja koji potiču od vozača, putnih i saobraćajnih uslova eksploatacije na promenu režima kretanja, a koji su i dodatno prošireni korektivnim faktorima sa kojima se simuliraju međusobni uticaji vozila u saobraćajnom toku. Takođe u svrhu simulacije radnih uslova tokom punjenja posuda, obuhvaćeni su ulazni parametri koji proističu od transportnih, klimatskih uslova i tehničkih karakteristika razmatranih nadgradnji, na napunjenost posuda i količinu transportovanog gasa po vožnji. Time je ostvarena uzajamna povezanost između ulaznih parametara (srednje temperature vazduha, ukupne zapremine posuda, radnog pritisaka posuda, hemijskih karakteristika gasa i faktora kompresibilnosti) na količine transportovanog gasa i masene parametre vozila, odnosno njihovog uticaja na povećanje otpora kretanju i potrošnju goriva. Tačnost izlaznih rezultata metode u zavisnosti je od ulaznih parametara, tj. njihove dostupnosti i kvaliteta. U narednom odeljku rada, kako je navedeno u opisu modela procene potrošnje goriva, biće opisana metoda procene potrošnje goriva zasnovana na univerzalnoj karateristici motora.

4.4.2 Metoda određivanja potrošnje goriva primenom univerzalne karakteristike motora

Metoda procene potrošnje goriva primenom dijagrama univerzalne karakteristike motora zasniva se na grafoanalitičkom prikazu odnosa između specifične efektivne potrošnje goriva, efektivne snage i snage potrebne za savladavanje otpora kretanju, u zavisnosti od broja obrtaja kolenastog vratila. Krive konstantne snage i kriva potrebne snage za savladavanje svih otpora kretanja vozila određene u funkciji od broja obrtaja kolenastog vratila, odnosno brzine skupa vozila, konstruišu se na dijagram univerzalne karakteristike. Presečne tačke ovih krivih (konturnih krivih konstantne specifične efektivne potrošnje, konstantne snage i krive potrebne snage za savladavanje svih otpora kretanja vozila) odgovaraju specifičnoj efektivnoj potrošnji goriva u datim režimima rada motora. Regresionom analizom utvrđuje se rezultujuća kriva specifične potrošnje goriva za definisani broj stepena prenosa i pun opseg brzina. Metoda, pored karakteristika pogonskog agregata, uzima u obzir eksploataciono–tehničke karakteristike vozila i parametre koji potiču od transportnih, putnih i klimatskih uslova. Svoju primenu nalazi u postupcima analiza performansi vozila, za ocenu efikasnosti motora pri različitim režimima rada, procenama potrošnje goriva i dr. Prednosti metode su visoka tačnost u postupcima procene potrošnje goriva za sve režime rada, kao i mogućnost optimizacije radne tačke motora sa ciljem postizanja minimalne potrošnje. Kao osnovni nedostatak navodi se otežana dostupnost ulaznih podataka za određene motore, tj. njihove univerzalne karakteristike.

U literaturi, u zavisnosti od cilja istraživanja i analize određenih motorskih veličina, za dijagram univerzalne karakteristike prisutni su nazivi *(engl. Engine Universal Performance Map (EUPM), Fuel Consumption Map (FCM), Brake Specific Fuel Consumption Map (BSFC))*, pri čemu svaki od naziva prikazuje promenu specifične potrošnje goriva u zavisnosti od određene motorske veličine u celoj radnoj oblasti motora (Golverk, 1994; Shayler, Chick and Eade, 1999; Bao, 2011; Durković i Grujičić, 2018; Kreyer, Müller and Esch, 2019). Autor (Golverk, 1994) u istraživanju prezentuje postupak za analitičko određivanje univerzalne karakteristike dizel motora *(EUPM)*, na osnovu dostupnih motorskih parametara (snaga, obrtni moment, broj obrtaja kolenastog vratila pri maksimalnoj snazi i obrtnom momentu i dr.) za pun radni opseg motora. Kao ključni doprinos istraživanja, izdvaja se mogućnost lakšeg poređenja i procene performansi motora sa aspekta specifične potrošnje goriva i drugih motorskih veličina, uz smanjenje potrebe za detaljnim eksperimentalnim ispitivanjima. S druge strane autori (Shayler et. al., 1999) u istraživanju prezentuju metodu za procenu specifične potrošnje

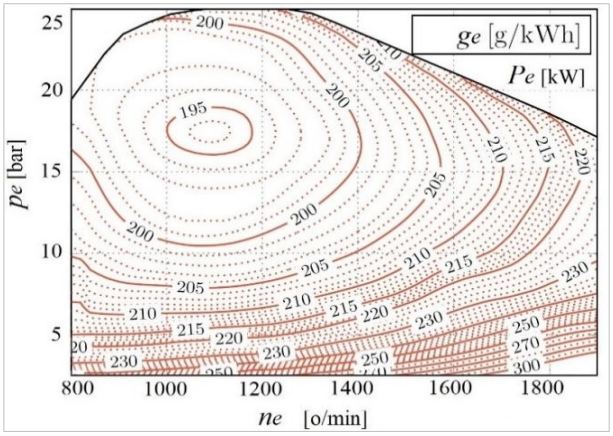
goriva za benzinske motore na osnovu dostupnih kataloških podataka. Metoda primenom matematičkih relacija određuje specifičnu potrošnju goriva *(BSFC)*, kao funkciju broja obrtaja kolenastog vratila i opterećenja motora, na osnovu ulaznih parametara (radne zapremine, stepena kompresije, broja cilindara, srednjeg efektivnog pritisaka, i dr). Kao ključni doprinos istraživanja izdvaja se metod zasnovan na setu jednačina sa kojim je moguće odrediti specifičnu potrošnju goriva pri različitim režimima rada motora na osnovu dostupnih podataka. Slično prethodnim istraživanjima, autor (Bao, 2011) prezentuje postupak za određivanje potrošnje goriva zasnovan na univerzalnoj karakteristici kod vozila opremljenih sa oto i dizel motorima. Razvijeni postupak povezuje promenu snage motora, broja obrtaja kolenastog vratila i specifične potrošnje goriva sa parametrima koji potiču od eksploatacionih uslova vozila. Kao doprinos istraživanja izdvaja se praktičan pristup proceni potrošnje goriva i praćenju gorivne ekonomije vozila. Autori (Durković i Grujičić, 2018) u radu predstavljaju pristup za određivanje minimalne specifične potrošnje goriva dizel motora u zavisnosti od zadate snage, efektivnog pritiska i broja obrtaja kolenastog vratila. Funkcionalna zavisnost specifične potrošnje goriva od opterećenja motora, određena je regresionom analizom. Razvijeni postupak za određivanje optimalne radne tačke i praćenje performansi motora, prema kriterijumima maksimalne ekonomičnosti, izdvaja se kao ključni doprinos istraživanja. Za razliku od prethodnih istraživanja koja se odnose na vozila, Autori (Kreyer i ostali, 2019) predstavljaju metodu za procenu potrošnje goriva kod oto motora u avioindustiji. Metoda omogućava procenu potrošnje za različite režime rada na osnovu dostupnih motorskih parametara u funkciji od visine leta. Doprinosi istraživanja ogledaju se u postupcima procene i praćenja performansi motora, prema kriterijumu minimalne potrošnje, u svrhu odabira optimalne trase leta (letne misije). Osnovna sličnost prethodnih istraživanja sa modelom i metodom prezentovanom u disertaciji je primena analitičkog pristupa za određivanje specifične potrošnje goriva koja se zasniva na dostupnim motorskim veličinama preuzetim sa univerzalne karakteristike motora. Kao osnovne razlike izdvajaju se specifičnosti transporta gasova i objedinjavanje međusobnih uticaja eksploataciono–tehničkih karakteristika i uslova eksploatacije na otpore kretanju i potrošnju goriva. Dalje u tekstu, obrađene su teorijske osnove neophodne za funkcionisanje modela primenom metode zasnovane na univerzalnoj karakteristici motora.

4.4.2.1 Univerzalna karakteristika motora

Dijagram univerzalne karakteristike motora predstavlja kombinaciju karakteristika opterećenja i brzinskih karakteristika motora sa kojima se prikazuju promene određenih motorskih veličina za pun radni opseg (Martyr and Plint, 2012). Kao takva, univerzalna karakteristika motora ima ulogu da dijagramski, na jasan i pregledan način, prikaže promene određene motorske veličine u celoj radnoj oblasti motora. Najčešće, na ovakav način se prikazuju promene specifične efektivne potrošnje goriva g_e u zavisnosti od srednjeg efektivnog pritisaka p_e i broja obrtaja kolenastog vratila n_e, ali je moguće prikazati i druge motorske veličine, poput specifične emisije izduvnih gasova, temperature izduvnih gasova i dr. (Tomić i Petrović, 2000; Martyr and Plint, 2012; Masser and Hoffmann, 2021). Univerzalnu karakteristiku motora moguće je snimiti eksperimentalnim putem, tj. ispitivanjima na probnim stolovima, navedeno u poglavlju 3., ili ukoliko se ne zahteva visoka preciznost rezultata, analitičkim putem primenom odgovarajućih softvera (Martyr and Plint, 2012).

Primer dijagrama univerzalne karakteristike dizel motora velike radne zapremine, prikazan je na Slici 32. Dijagram na apscisnoj osi sadrži broj obrtaja kolenastog vratila n_e, a na ordinatnoj osi srednji efektivni pritisak p_e. Linije konstantnih vrednosti specifične efektivne potrošnje

goriva g_e, prikazane su kao konture u nijansama crvene boje. Najniža vrednost (g_e = 195 g/kWh) predstavlja optimalnu radnu tačku i očitava se sa dijagrama za radni režim ($p_e \approx 17$ bar i $n_e \approx 1100$ o/min). Optimalna radna tačka predstavlja najpovoljniji režim rada motora, tj. najmanju potrošnju goriva za svaki kilovat snage u toku jednog časa. Nasuprot tome najveća vrednost specifične efektivne potrošnje goriva (g_e = 300 g/kWh) javlja se pri niskim opterećenjima (p_e < 5 bar) i pri visokom broju obrtaja ($n_e \approx 1800$ o/min), što ukazje na manje iskorišćenje radne zapremine motora u smislu razvijenog rada. Promene broja obrtaja kolenastog vratila (povećanje ili smanjenje) u odnosu na optimalnu radnu tačku, pri manjim opterećenjima motora, utiču na povećanje vrednosti g_e. Promena efektivne snage motora P_e u zavisnosti od promene broja obrtaja kolenastog vratila n_e, prikazana je na dijagramu kao konturna crna linija. U narednom odeljku, po koracima, opisana je metoda procene potrošnje goriva zasnovana na podacima sa univerzalne karakteristike motora.

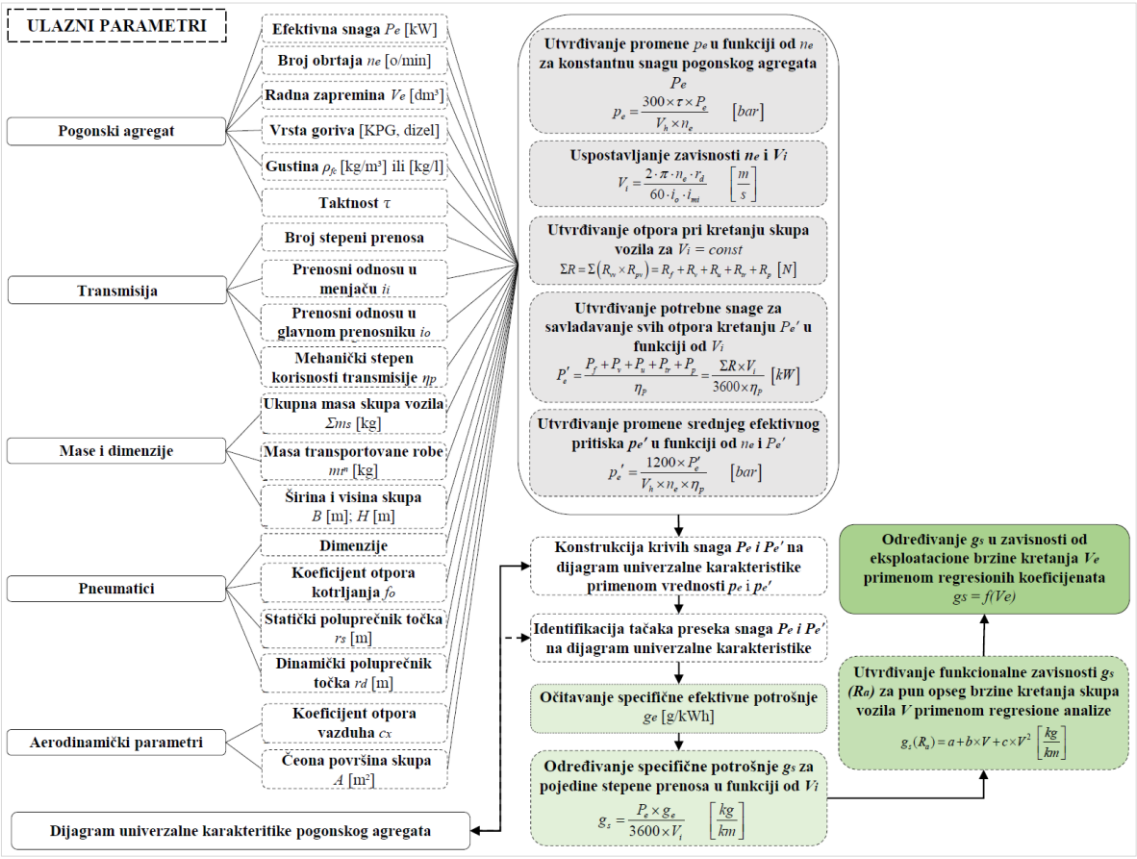


Slika 32. Dijagram univerzalne karakteristike motora (Izvor: Masser and Hoffmann, 2021)

4.4.2.2 Određivanje potrošnje goriva primenom univerzalne karakteristike motora

Postupak metode procene potrošnje goriva zasnovan na dijagramu univerzalne karakteristike motora, prikazan je na Slici 33. Postupak procene odvija se kroz nekoliko koraka. U prvom koraku, neophodno je identifikovati sve potrebne ulazne parametre koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila, transportnih, putnih i klimatskih uslova eksploatacije (tj. parametre koji se odnose na motor, transmisiju, mase i dimenzije vozila, pneumatike i aerodinamičke karakteristike vozila). Parametri motora uključuju maksimalnu efektivnu snagu motora P_{emax}, broj obrtaja kolenastog vratila pri maksimalnoj snazi n_{emax}, vrstu pogonskog goriva i njegovu zapreminsku masu ρ_{fc}, radnu zapreminu V_h, kao i taktnost motora τ. Parametri transmisije uključuju: broj stepeni prenosa u menjačkom prenosniku snage, prenosne odnose u pojedinim stepenima prenosa i_i, prenosni odnos u glavnom prenosniku snage i_o i ukupni stepen korisnosti transmisije η_p. Parametri koji se odnose na mase i dimenzije vozila, pneumatike i aerodinamičke karakteristike, uključuju: masene i dimenzione parametre vučnih i priključnih vozila, količinu transportovanog gasa m_t po vozilu–nadgradnji, tip i dimenzije pneumatika, statički i dinamički poluprečnik točka r_s i r_d, kao i koeficijente otpora kotrljanju f_o i vazduha c_x.

Klimatskim uslovima obuhvaćeni su parametri koji su implicitno sadržani u izrazima koji opisuju otpore kretanju, poput otpora vazduha, gde gustina vazduha ρ_v i brzina vetra V_v direktno utiču na veličinu otpora. Takođe, temperatura vazduha t utiče na količinu transportovanog gasa m_t i ukupnu masu vozila, te stoga indirektno utiču na veličine otpora kretanju koji su u zavisnosti od mase (otpor kotrljanju, usponu i dr.). Za potrebe funkcionisanja metode potrebno je identifikovati i dijagrame univerzalne karakteristike, sa krivama konstantne specifične efektivne potrošnje goriva g_e u zavisnosti od broja obrtaja kolenstog vratila n_e i opterećenja (srednjeg efektivnog pritiska p_e), za razmatrana vučna vozila. Ulazni parametri za razmatrane skupove vozila navedeni su u poglavljima 3 i 4.



Slika 33. Metod procene potrošnje goriva zasnovan na dijagramu univerzalne karakteristike

Drugi korak obuhvata utvrđivanje promene vrednosti srednjeg efektivnog pritiska p_e u funkciji od broja obrtaja kolenastog vratila n_e za konstantnu snagu motora P_e. Vrednosti srednjeg efektivnog pritiska p_e mogu se odrediti na dva načina, pri čemu izbor načina prvenstveno zavisi od dostupnosti podataka. Prvi način, ukoliko je izvršena analiza vučno–dinamičkih performansi vozila, ulazne podatke moguće je preuzeti iz rezultata analize (podatke o snazi motora P_e i promeni potrebne snage za savladavanje svih otpora kretanju P_e' u funkciji broja obrtaja kolenastog vratila i dr.). Postupak analize dela vučno–dinamičkih performansi opisan u poglavljima 4.2 i 4.3, predstavlja ključnu osnovu za formiranje ulaznih podataka za određivanje potrošnje goriva primenom univerzalne karakteristike motora. Rezultati analize predstavljaju osnovu za konstrukciju krivih konstantne snage motora P_e i krive snage potrebne za savladavanje svih otpora kretanju P_e'. Drugi način primenjuje se kada rezultati iz prethodne analize vučno–dinamičkih performansi nisu dostupni. U tom slučaju potrebno je sprovesti detaljan postupak promene efektivne snage P_e i broja obrtaja kolenastog vratila n_e unutar radnog opsega motora, prikazano u Tabeli 31.

Srednji efektivni pritisak p_e *(engl. Mean Effective Pressure)* je relativna veličina koja omogućava poređenje različitih motora u različitim režimima rada. Po svojoj suštini, ovaj parametar pokazuje koliki efektivni rad motor ostvaruje po jedinici radne zapremine. Veća vrednost srednjeg efektivnog pritiska ukazuje na bolje iskorišćenje radne zapremine motora u smislu razvijenog rada (Tomić i Petrović, 2000; Ivković, 2020).

Efektivnu snagu u zavisnosti od broja obrtaja kolenastog vratila, moguće je odrediti izrazom [1.36] (Tomić i Petrović, 2000; Ivković i Spasić, 2023).

$$P_e = \frac{p_e \times V_h \times n_e}{300 \times \tau} \quad [kW] \qquad [1.36]$$

gde su: p_e – srednji efektivni pritisak [bar], n_e – broj obrtaja kolenastog vratila [o/min], V_h – radna zapremina pogonskog agregata [dm³], τ – taktnost motora (broj radnih taktova u odnosu na jedan radni ciklus; $\tau = 2$ za dvotaktne, radni ciklus se obavlja u dva takta; $\tau = 4$ za četvorotaktne, radni ciklus se obavlja u četiri takta), 300 – konstantna vrednost sa kojom se vrši korekcija za vrednosti srednjeg efektivnog pritiska izraženog u [bar].

Da bi se krive konstantne snage motora P_e konstruisale na dijagramu, potrebno je odrediti vrednosti srednjeg efektivnog pritiska p_e za odgovarajuće opsege P_e i n_e. Vrednosti p_e za dizel motore sa natpunjenjem i pri punom opterećenju, namenjene za teretna vozila, dostižu do 26 bar (Scheiber, Nowak, Lorenz, Pfeil, Koch and Kasper, 2021). Nasuprot tome, vrednosti p_e za oto motore sa natpunjenjem i pogonom na komprimovani prirodni gas, pri punom opterećenju kreću se u rasponu od 16 bar do 20 bar (Naber, Henes and Henes, E., 2020; De Simio, Iannaccone, Guido, Napolitano and Maiello, 2024.).

Utvrđivanje promene srednjeg efektivnog pritisaka p_e za odgovarajuće opsege efektivne snage P_e i broja obrtaja kolenastog vratila n_e, moguće je utvrditi primenom izraza [1.37], odnosno izrazom [1.38] za četvorotaktne motore (Ivković i Spasić, 2023):

$$p_e = \frac{300 \times \tau \times P_e}{V_h \times n_e} \quad [bar] \qquad [1.37]$$

$$p_e = \frac{1200 \times P_e}{V_h \times n_e} \quad [bar] \qquad [1.38]$$

Utvrđene vrednosti srednjeg efektivnog pritiska p_e koriste se za konstrukciju krivih konstantne snage. Deo radnog opsega za jedan razmatrani dizel motor (četvorotaktni, linijski, zapremine 12,8 dm³) prikazan je u Tabeli 31. Vrednosti srednjeg efektivnog pritiska izraženog u barima dobijene na osnovu promene efektivne snage motora i broja obrtaja kolenastog vratila. U navedenom kontekstu, pre ucrtavanja krive promene P_e u dijagram univerzalne karakteristike motora, potrebno je uspostaviti vezu između broja obrtaja kolenastog vratila n_e i brzine kretanja skupa vozila V_i za pojedine stepene prenosa u menjaču. Veza između n_e i V_i prikazana je izrazom [1.10] navedeno u poglavlju 4.3.

Tabela 31. Vrednosti srednjeg efektivnog pritiska p_e za različite opsege P_e i n_e

P_e [kW] /n_e [o/min]	1100	1189	1278	1367	1456	1544	1633	1722	1811	1900
P_e = 217 [kW]	18,510	17,126	15,935	14,899	13,989	13,184	12,466	11,823	11,243	10,717
P_e = 221 [kW]	18,839	17,431	16,218	15,163	14,237	13,418	12,688	12,033	11,442	10,907
P_e = 225 [kW]	19,168	17,735	16,501	15,428	14,486	13,652	12,909	12,243	11,642	11,097
P_e = 229 [kW]	19,497	18,039	16,784	15,693	14,734	13,886	13,131	12,453	11,842	11,288
P_e = 233 [kW]	19,826	18,343	17,067	15,957	14,983	14,120	13,352	12,663	12,041	11,478
P_e = 241 [kW]	20,483	18,952	17,633	16,487	15,480	14,589	13,795	13,083	12,441	11,859
P_e = 244 [kW]	20,812	19,256	17,917	16,751	15,728	14,823	14,016	13,293	12,640	12,049
P_e = 248 [kW]	21,141	19,560	18,200	17,016	15,977	15,057	14,238	13,503	12,840	12,239
P_e = 252 [kW]	21,470	19,865	18,483	17,281	16,225	15,291	14,459	13,713	13,040	12,430
P_e = 256 [kW]	21,799	20,169	18,766	17,545	16,474	15,526	14,681	13,923	13,240	12,620
P_e = 260 [kW]	22,127	20,473	19,049	17,810	16,722	15,760	14,902	14,133	13,439	12,811
P_e = 264 [kW]	22,456	20,777	19,332	18,074	16,971	15,994	15,124	14,343	13,639	13,001
P_e = 268 [kW]	22,785	21,081	19,615	18,339	17,219	16,228	15,345	14,553	13,839	13,191
P_e = 271 [kW]	23,114	21,386	19,898	18,604	17,468	16,462	15,566	14,763	14,038	13,382
P_e = 275 [kW]	23,443	21,690	20,181	18,868	17,716	16,697	15,788	14,973	14,238	13,572
P_e = 279 [kW]	23,771	21,994	20,464	19,133	17,965	16,931	16,009	15,183	14,438	13,762

P_e = 283 [kW]	24,100	22,298	20,747	19,398	18,213	17,165	16,231	15,393	14,638	13,953
P_e = 287 [kW]	24,429	22,603	21,030	19,662	18,462	17,399	16,452	15,603	14,837	14,143
P_e = 291 [kW]	24,758	22,907	21,313	19,927	18,710	17,633	16,674	15,813	15,037	14,333
P_e = 295 [kW]	25,087	23,211	21,596	20,192	18,959	17,867	16,895	16,023	15,237	14,524
P_e = 298 [kW]	25,415	23,515	21,879	20,456	19,207	18,102	17,117	16,233	15,436	14,714
P_e = 302 [kW]	25,744	23,819	22,162	20,721	19,456	18,336	17,338	16,443	15,636	14,905
P_e = 306 [kW]	26,073	24,124	22,446	20,986	19,704	18,570	17,559	16,653	15,836	15,095
P_e = 310 [kW]	26,402	24,428	22,729	21,250	19,953	18,804	17,781	16,863	16,036	15,285

Treći korak postupka obuhvata utvrđivanje svih otpora kretanju koji deluju na skup vozila (sastav vučnog i priključnog vozila) pri ravnomernom kretanju. Suma otpora kretanju za skup vozila prikazana izrazom [1.8], navedeno u poglavlju 4.3. Naredni korak obuhvata utvrđivanje potrebne snage motora za savladavanje svih otpora kretanju P_e' u funkciji od broja obrtaja kolenastog vratila n_e, odnosno brzine kretanja vozila V_i, za pojedine stepene prenosa u menjaču primenom izraza [1.25]. Na osnovu određenih vrednosti snage P_e', u četvrtom koraku, pristupa se utvrđivanju vrednosti srednjeg efektivnog pritiska p_e'. Vrednosti srednjeg efektivnog pritiska p_e' za odgovarajuće opsege potrebne snage motora za savladavanje svih otpora kretanju P_e', moguće je utvrditi primenom izraza [1.39] (Ivković i Spasić, 2023):

$$p_e' = \frac{1200 \times P_e'}{V_h \times n_e \times \eta_p} \quad \left[bar\right] \qquad [1.39]$$

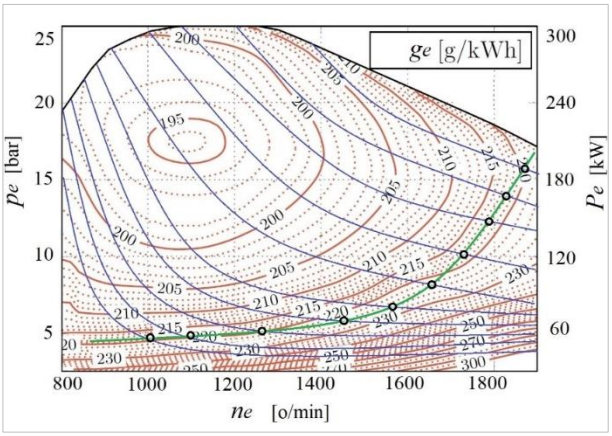
gde su: 1200 – konstantna vrednost kojom se vrši korekcija vrednosti potrebne snage motora za savladavanje svih otpora kretanju P_e' izražene u [kW].

Izrazom [1.39] uspostavljena je veza između potrebne snage, broja obrtaja kolenastog vratila, radne zapremine motora i stepena korisnosti transmisije sa srednjim efektivnim pritiskom motora. U petom koraku, na osnovu određenih vrednosti p_e i p_e', vrednosti krive konstantne snage P_e i kriva potrebne snage za savladavanje svih otpora P_e', ucrtavaju (konstruišu) se u dijagram univerzalne karakteristike motora, i na taj način se formiraju krive preseka. Nakon konstrukcije (pojedine krive konstantne snage P_e i krive potrebne snage za savladavanje svih otpora P_e') vrši se identifikacija tačaka njihovog preseka. Tačke preseka predstavljaju odgovarajuću specifičnu efektivnu potrošnju goriva g_e. Vrednosti g_e određuje se grafoanalitičkom metodom za različite režime rada motora, gde svaka tačka preseka odgovara određenom režimu rada i pripadajućoj vrednosti specifične efektivne potrošnje. Bitno je i napomenuti da se postupak grafoanalitičke metode očitavanja specifične potrošnje goriva (presečne tačke), može zameniti softverskim očitavanjem. Specifična potrošnja goriva g_s, određuje se primenom izraza [1.40]

$$g_s = \frac{P_e \times g_e}{3600 \times V_i} \quad \left[\frac{kg}{km}\right] \qquad [1.40]$$

gde su: P_e – efektivna snaga izražena u [kW], g_e – specifična efektivna potrošnja [g/kWh], V_i – brzina kretanja skupa vozila u pojedinom stepenu prenosa [km/h], 3600 – konstantna vrednost sa kojom se vrši korekcija časa u sekunde.

Primer dijagrama univerzalne karakteristike dizel motora sa krivama P_e (krive označene plavom bojom) i krivom P_e' (kriva označena zelenom bojom) prikazan je na Slici 34. Dijagram na apscisnoj osi sadrži broj obrtaja kolenastog vratila n_e, a na ordinatnim osama sadrži vrednosti srednjeg efektivnog pritisaka p_e i efektivne snage motora P_e. Linije konstantnih vrednosti specifične efektivne potrošnje goriva g_e, prikazane su kao konture označene nijansama crvene boje. Vrednosti odgovarajuće g_e, za brojeve obrtaja kolenastog vratila koji odgovaraju tačkama preseka (označene crnim kružnicama), očitavaju se sa dijagrama. Primenom prethodno određenih vrednosti g_e i V_i, u šestom koraku primenom izraza [1.40], određene su vrednosti specifične potrošnje goriva g_s vozila u zavisnosti od brzine kretanja. Vrednosti g_s izražene su u kilogramima sagorelog goriva po kilometru pređenog puta [kg/km]. Celokupni postupak prikazan na Slici 33. odnosi se na jedan stepen prenosa, dok se matrica proračuna formira za određeni broj stepena prenosa u menjačkom prenosniku snage. Nakon što se formiraju pojedinačne krive specifične potrošnje goriva g_s, za svaki stepen prenosa u zavisnosti od brzine kretanja, pristupa se utvrđivanju rezultujuće krive specifične potrošnje goriva primenom regresione analize, za ceo opseg brzina. U poslednjem koraku, primenom regresione analize utvrđuje se funkcionalna zavisnost specifične potrošnje goriva i brzine kretanja skupa vozila, detaljno opisana u metodi Šlipea.



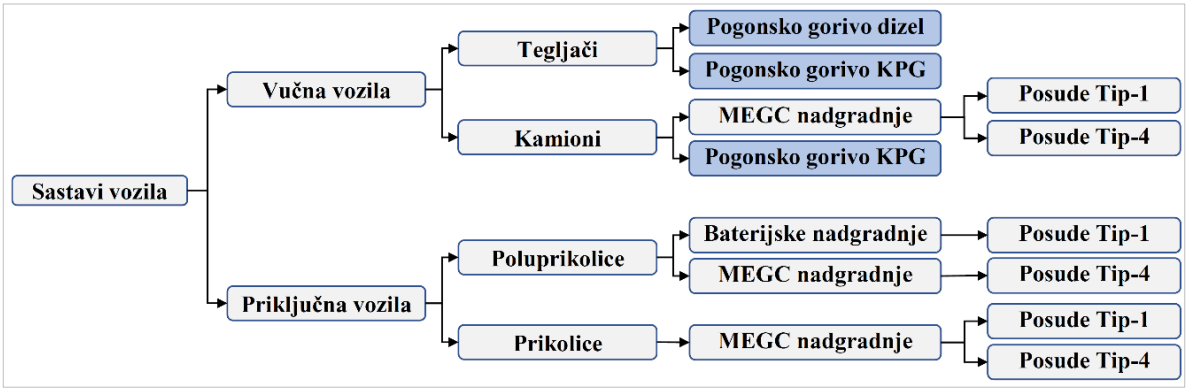
Slika 34. Dijagram univerzalne karakteristike motora sa krivama konstantne snage i potrebne snage za savladavanje svih otpora kretanju *(Izvor: Masser and Hoffmann, 2021)*

4.4.2.3 Zaključna razmatranja

Razmatranom metodom moguće je ostvariti jasan uvid u odnos između opterećenja motora, broja obrtaja kolenastog vratila i specifične potrošnje goriva. Kako je i prethodno navedeno, osnovna ograničenja ogledaju se prvenstveno u dostupnosti i kvalitetu ulaznih podataka koji definišu univerzalnu karakteristiku određenih motora. Osnovna razlika u odnosu na metodu određivanja potrošnje goriva primenom brzinske karakteristike motora, tj. metode Šlipea, je u broju ulaznih podataka i postupku određivanja specifične efektivne potrošnje goriva. Metod Šlipea iako ima više ulaznih podataka, predstavlja jednostavniju metodu za modeliranje, pre svega zbog dostupnosti ulaznih podataka (tehničkih karakteristika vozila i pogonskih agregata), tj. brzinske karakteristike pri maksimalnoj snazi motora dostupnije su od univerzalnih karakteristika motora. Navedena činjenica predstavlja ključni razlog za izbor metode određivanja potrošnje goriva zasnovane na brzinskoj karakteristici motora, kao osnovne metode razvijenog modela. Bitno je napomenuti da je određivanje potrošnje goriva, pored navedenih metoda, moguće utvrditi i primenom nekih od softverskih rešenja, poput HDM *(engl. Highway Development and Management Model),* VECTO ili FEACC *(engl. Fuel Efficiency Analytics Consumption Calculator)* i dr. Navedeni softveri pružaju mogućnost određivanja potrošnje goriva u zavisnosti od velikog broja ulaznih parametara koji obuhvataju podatke o eksploataciono–tehničkim karakteristikama vozila, transportnim, putnim i saobraćajnim uslovima eksploatacije, poput kategorija vozila, veličine flote, starosti vozila i broja pređenih kilometara, količinama transportovanih tona robe, do stanja kolovozne konstrukcije, prosečnog godišnjeg dnevnog saobraćaja PGDS i dr.

4.4.3 Opis i uslovi merenja potrošnje goriva

U ovom odeljku opisani su uslovi i postupci merenja potrošnje goriva, kod skupova vozila navedenih u Tabeli 24. Rezultati potrošnje goriva utvrđene primenom modela prikazanog na Slici 18., i metode Šlipea prikazane na Slici 23., analizirani su sa rezultatima merenja potrošnje goriva dobijenih primenom dve metode. Polazeći od ciljeva rada, zahtevane tačnosti i metoda navedenih u poglavlju Poglavlju 3, merenja su izvršena sa metodom zasnovanom na primeni prenosnog dijagnostičkog uređaja koji putem OBD interfejsa pristupa podacima elektronske upravljačke jedinice vozila EUJ, kao i metodom očitavanja količine pogonskog goriva u rezervoaru/posudi tokom punjenja na stanici za snabdevanje gorivom. Šema ispitivanja razmatranih skupova vozila prikazana je na Slici 35.



Slika 35. Šema razmatranih skupova vozila (Izvor: Vašalić i ostali, 2024)

Vučna vozila obuhvaćena istraživanjem pripadaju kategoriji N_3 i prema obliku i nameni karoserije podeljena su na tegljače i kamione. Tegljači (BC) koriste komprimovani prirodni gas i dizel kao pogonska goriva, dok kamioni (BA), za pogon koriste komprimovani prirodni gas. Kamioni na svom tovarnom delu poseduju opremu za prihvat MEGC nadgradnji sa dva tipa posuda, Tip–1 i Tip–4. S druge strane, priključna vozila pripadaju kategoriji O_4 i podeljena su prema klasama na prikolice (T) i poluprikolice (ST). Prikolice na svom tovarnom delu su opremljenje sa uređajima i opremom za smeštaj i prihvat MEGC nadgradnji sa dva tipa posuda, Tip–1 i Tip–4. U slučaju poluprikolica, nadgradnje su podeljene na dva dela, deo poluprikolica opremljen je sa baterijskim nadgradnjama i posudama Tip–1, a drugi deo poluprikolica opremljen je sa MEGC nadgradnjama i posudama Tip–4, prikazano na Slici 35**.** Merenja potrošnje goriva realizovana su na trasi koja obuhvata mesto utovara robe i mesto istovara robe. Polazna tačka merenja, mesto utovara robe (gasa), ujedno je i stanica za snabdevanje gorivom. Razmatrana trasa pripada delu putne mreže Republike Srbije i prema kategorizaciji državnih puteva podeljena je na puteve kategorije IB i II, opštinske puteve i ulice, navedeno u poglavlju 3 i Prilogu 1. U skladu sa navedenim, prvenstveno u cilju simulacije realnih uslova vožnje, trasom su obuhvaćeni gradski i međugradski uslovi vožnje, koji uključuju ravnomerno i promenljivo kretanje vozila. U zavisnosti od konfiguracije terena, na trasi je zastupljen ravničarski, brežuljkasti i u manjem obimu brdsko–planinski teren. Stanje i kvalitet putne infrastrukture je zadovoljavajući i odgovara pomenutim kategorijama. Zastor kolovozne konstrukcije, na celoj dužini trase, izrađen je od asfalt–betona sa bitumeniziranim nosećim slojem (Cvetanović i Banić, 2007; Putevi Srbije, 2025). Važno je istaći da vozila puna odlaze na mesto istovara, a da se u povratku prazna vraćaju na mesto utovara robe, što odgovara ponavljajućoj trasi sa delimičnim iskorišćenjem. Tokom merenja, vozila su bila tehnički ispravna, na radnim temperaturama i sa važećim sertifikatima koji se odnose na transport opasne robe.

Merenje je izvršeno sa prenosnim dijagnostičkim uređajem ANCEL X7 HD prikazanim na Slici 36, prvenstveno namenjenim za očitavanje podataka iz elektronske upravljačke jedinice vozila EUJ putem odgovarajućeg dijagnostičkih interfejsa–konektora (navedeno u poglavlju 3.3). Veza, između konektora i dijagnostičkog uređaja, ostvaruje putem Bluetooth adaptera. Navedeni uređaj, pruža mogućnost praćenja i zapisa podataka iz EUJ ili drugih sistema na vozilu u realnom vremenu, poput: trenutne brzine vozila [km/h], broja obrtaja kolenastog vratila [o/min], temperature rashladne tečnosti motora [°C], pritiska goriva u glavnoj magistrali [bar], ubrizgane ciklusna količina goriva [mg/cikl], zapisa o vremenu i dr. Aplikacija uređaja u proseku provede deset merenja u sekundi, što se za navedeni kontekst rada pokazalo značajno i prihvatljivo. Softver uređaja kompatibilan je sa većinom evropskih proizvođača teretnih vozila koji su proizvedeni nakon 2004. godine, uključujući i razmatrana vozila u ovom radu.



***Slika 36. Dijagnostički uređaj ANCEL X7 HD** (Izvor: Autor)*

Vrednosti specifične časovne potrošnje goriva [kg/h] izračunate su primenom izraza [1.41] (Popović i Miljić, 2018), na osnovu izmerenih podataka o trenutnoj ubrizganoj ciklusnoj količini goriva, broju obrtaja kolenastog vratila i poznatih eksploataciono–tehnički parametra razmatranih pogonskih agregata, poput taktnosti, rasporeda i broja cilindara i dr. Merna nesigurnost primenjene metode, u zavisnosti je od dijagnostičkog uređaja i kreće se u opsegu ±6% (Ragon and Rodríguez, 2021; Rexeis, 2021; Pavlovic et. al., 2021).

$$g_s = q_{goriva} \times 10^{-6} \times N_c \times \frac{n_e}{2} \times 60 \quad \left[\frac{kg}{h}\right] \qquad [1.41]$$

gde su: q_{goriva} – ubrizgana ciklusna količina goriva [mg/ciklus], n_e – trenutni broj obrtaja kolenastog vratila [o/min], N_c – broj cilindara, korektivni faktori – 10^{-6} miligram u kilogram, tj. 60 minut u čas, broj ciklusa u jedinici vremena ($2\ n_e/\tau$ – taktnost $\tau=2$ za dvotaktne, odnosno $\tau=4$ za četvorotaktne motore).

Kao doprinos navedenom na Slikama 37 i 38, prikazan je deo procesa prikupljanja statističkih podataka za određivanje ukupne prosečne potrošnje na trasi, tj. očitavanja prosečne potrošnje goriva sa komandne table vozila u povratku, na mestu utovara robe. Navedene vrednosti se odnose na vučna vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas, tj. kamion koji pripada skupu vozila BA_{KPG} (T) Tip–1 + (T) Tip–1 (Slika 37) i tegljač koji pripada skupu vozila BC_{KPG} + (ST) Tip–4, (Slika 38).



Slika 37. Očitavanje prosečne potrošnje goriva na mestu istovara robe za vučno vozilo–kamion, koje pripada skupu vozila BA_{KPG} Tip–1 + (T) Tip–1 (Izvor: Autor)



Slika 38. Očitavanje vrednosti prosečne potrošnje goriva na mestu utovara robe za vučno vozilo–tegljač, koje pripada skupu vozila BC_{KPG} + (ST) Tip–4 (Izvor: Autor)

U **Tabeli. 32**, navedeni su rezultati merenja, dobijeni primenom prenosnog dijagnostičkog uređaja i očitavanjem količine goriva tokom punjenja na stanici za snabdevanje. Utvrđene vrednosti potrošnje goriva razmatranih skupova vozila u odlasku i povratku, zbog obimnosti podataka, navedene su kao prosečne vrednosti za oba smera. Vrednosti količine goriva u rezervoarima, odnosno posudama, izračunate su na osnovu poznatih tehničkih parametara: zapremine rezervoara i posuda, pritiska punjenja, fizičko–hemijskih karakteristika goriva, temperaturnih uslova tokom punjenja i, u slučaju prirodnog gasa, faktora kompresibilnosti.

Rezultati merenja potrošnje goriva

Metoda očitavanja količine pogonskog energenta u rezervoaru/posudi tokom punjenja na stanici za snabdevanje (Metoda 1)

Metoda zasnovana na primeni prenosnog dijagnostičkog uređaja (Metoda 2)

Oznaka (kod) vozila FL

UN oznaka transportovane robe UN 1971

Ulazni parametri											Metoda 1			Metoda 2	Poređenje
Trasa	Datum/vreme početak merenja	Pređeni put po smeru	Tip skupa vozila	Tip nadgradnje (posuda)	Ukupna zapremina posuda	Temp. uslovi, odlazak – dolazak	Količina transp. robe	Vrsta goriva	Ukupna zapremina rezervoara za gorivo	Količina goriva u rezervoarima (posudama)	Prosečna potrošnja odlazak	Prosečna potrošnja povratak	Prosečna potrošnja goriva oba smera	Prosečna potrošnja za oba smera metoda dijagnostike	Odstupanje između izmerenih vrednosti
		[km]			[dm^3]	[C°]	[kg]		[dm^3]	[kg]	[kg/100 km]			[kg/100 km]	[%]
Jabuka/ Pančevo/ Prahovo/Jabuka	05.04.2022/10:25:00	244	BC + (ST)	(Tip-4)	39900	17/21	7863	dizel	400	333,3	31,7	28,1	29,9	31,4	5,0
	04.04.2022/11:04:00		BC + (ST)	(Tip-1)	22350	15/20	3831	dizel	400	334,0	33,4	29,4	31,4	32,6	3,8
	21.03.2022/08:20:00		BC + (ST)	(Tip-4)	39900	18/22	7817	dizel	400	333,0	25,1	21,4	23,3	24,4	4,9
	25.03.2022/10:00:02		BC + (ST)	(Tip-1)	22350	16/18	3806	dizel	400	333,6	26,7	21,9	24,3	25,8	6,2
	28.03.2022/07:46:00		BC + (ST)	(Tip-4)	39900	19/23	7772	KPG	920	171,5*	32,7	27,8	30,3	31,9	5,5
	31.03.2022/10:58:00		BC + (ST)	(Tip-1)	22350	15/19	3830	KPG	920	173,9*	35,2	32,5	33,9	34,7	2,5
	08.04.2022/09:13:00		BA + (T)	(Tip-4)	37800	22/18	7404	KPG	1052	194,1*	33,3	29,1	31,2	33,1	6,1
	06.04.2022/07:58:00		BA + (T)	(Tip-1)	23400	13/11	4066	KPG	1052	196,2*	35,7	33,5	34,6	35,7	3,2

Izvor:
Vašalić, Ivković, Mladenović, Sekulić, Miličević i Suljovrujić. (2024). Prediction of Fuel and Exhaust Emission Costs of Heavy-Duty Vehicles Intended for Gas Transportation;
Vašalić, Ivković, Kaplanović, Miličević, Mladenović, Sekulić i Suljovrujić. (2025). Modelling of fuel consumption and fuel cost analysis for vehicles combination intended for compressed natural gas transportation.

*Na pritisku od 22 [MPa]

Bitno je napomenuti da odstupanja u vrednostima, između očitanih prosečnih vrednosti potrošnje goriva sa komandne table vozila i izračinatih utrošenih vrednosti količine goriva po smeru (utvrđenih na osnovu očitanih vrednosti sa mernih uređaja stanica za snabdevanje, čija je merna nesigurnost zakonski ograničena na ±0,5% Pravilnikom Ministarstva privrede (Pravilnici 93/2020 i 96/2023) u proseku oko 2%. S druge strane, odstupanja u izračunatim vrednostima potrošnje goriva utvrđenih na osnovu podataka dobijenih od prenosnog dijagnostičkog uređaja i podataka sa mernih uređaja stanica za snabdevanje, u proseku su oko 5%. Pomenuta odstupanja, za navedene ciljeve i kontekst rada, su prihvatljiva. Takođe, važno je istaći da je stanica za snabdevanje energentima u saglasnosti sa zakonskim propisima koji se odnose na redovne kontrole i tačnost uređaja za manipulaciju i točenje energenata, tj. Prema Pravilnicima (Pravilnici 93/2020 i 96/2023), koji se odnose na overavanja merila i mernih sistema, tj. uređaja za točenje energenata (goriva).

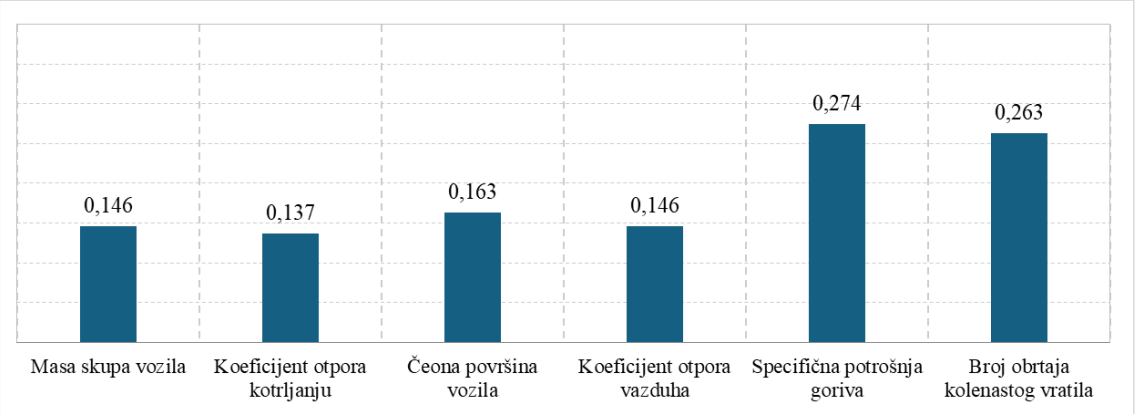
4.4.4 Analiza osetljivosti modela

Kako je navedeno u uvodnom delu rada, u svrhu utvrđivanja promene određenih ulaznih parametara na izlazne vrednosti razvijenog modela, sprovedena je analiza osetljivosti. Analiza osetljivosti sprovedena je metodom promene jednog parametra, pri čemu je ispitivan uticaj promena pojedinačnih ulaznih parametara na potrošnju goriva. Model posebno obrađuje podatke za deonice trase u odlasku i povratku, pri čemu se za svaki smer koriste različite vrednosti, nagiba, eksploatacione brzine vozila, faktora međusobnog uticaja vozila u saobraćajnom toku i količine transportovanog gasa. Na taj način promena uticajnih parametara na potrošnju goriva već je sadržana u osnovnim rezultatima modela. Uzimajući u obzir navedeno, analiza osetljivosti sprovedena je selektivno obuhvatajući deo parametra koji mogu imati značajan uticaj na potrošnju goriva, poput ukupne mase skupa vozila, koeficijenta otpora kotrljanju, koeficijenta otpora vazduha i čeone površine vučnog vozila. Takođe, u svrhu ocene osetljivosti modela i primenjenih metoda za određivanje potrošnje goriva, analiza je izvršena i za deo motorskih veličina, tj. promenu specifične potrošnje goriva pri maksimalnoj snazi motora i broja obrtaja kolenastog vratila. Proračun potrošnje goriva izvršen je posebno za svaki od navedenih parametara u opsegu promena –5%, –2,5%, 0%, 2,5% i +5%, prikazano u Tabeli 33. Dobijene vrednosti su upoređene sa referentnim scenarijom (0%), odnosno sa rezultatima dobijenim primenom modela.

Tabela 32. Analizirani parametri metode

Referentna vrednost prosečne potrošnje goriva po smeru na trasi 0,2735 [kg/km]									
Parametri	Opseg promene					Promena prosečne potrošnje goriva po smeru na trasi			
	–5%	–2,5%	0%	2,5%	5%	–5%	–2,5%	2,5%	5%
Masa skupa vozila m_{sv} [kg]	35794	36736	37678	38620	39562	0,2716	0,2725	0,2745	0,2755
Čeona površina vozila A [m²]	5,32	5,46	5,60	5,74	5,88	0,2714	0,2724	0,2746	0,2757
Koeficijent otpora kotrljanju f_o	0,0124	0,0127	0,0130	0,0133	0,0137	0,2715	0,2727	0,2747	0,2752
Koeficijent otpora vazduha c_x	0,523	0,536	0,55	0,9564	0,578	0,2710	0,2720	0,2740	0,2750
Specifična potrošnja goriva P_{emax} [g/kWh]	177,65	182,33	187,00	191,68	196,35	0,2700	0,2710	0,2750	0,2770
Broj obrtaja kolenastog vratila n_{emax} [°/min]	1520	1560	1600	1640	1680	0,2775	0,2754	0,2718	0,2703

Na osnovu dobijenih rezultata prosečnih vrednosti potrošnje goriva za zadate opsege, rezultati proračuna iskorišćeni su za utvrđivanje koeficijenta osetljivosti i rangiranje odabranih parametara prema njihovom relativnom značaju za procenu potrošnje goriva, prikazano na Slici 39.



Slika 39. Koeficijenti osetljivosti pojedinih ulaznih parametara modela

Koeficijentom osetljivosti kvantifikuju se uticaji relativnih promena pojedinačnih ulaznih parametra na relativnu promenu potrošnje goriva, pri nepromenjenim vrednostima ostalih

parametara. Veće vrednosti koeficijenta osetljivosti ukazuju na izraženiji uticaj posmatranog parametra na potrošnju goriva, odnosno na njegov veći relativni značaj u okviru sprovedene analize. Rezultati sprovedene analize pokazuju da razvijeni model pravilno reaguje na promene ulaznih parametara i omogućava identifikaciju parametara koji imaju najveći relativni značaj na procenu potrošnje goriva. Najveću osetljivost model pokazuje na promenu motorskih veličina, specifične potrošnje goriva sa vrednošću koeficijenta osetljivosti od 0,274, zatim slede broj obrtaja kolenastog vratila sa vrednošću 0,263, čeona površina vozila sa vrednošću 0,163, masa skupa vozila i koeficijent otpora vazduha sa osetljivošću 0,146 i koeficijent otpora kotrljanju sa osetljivošću 0,137. Upravo ovakav rezultat ukazuje da je osetljivost modela u funkciji od izabranih parametara, kao i na važnost tačnosti ulaznih parametra prilikom postavke modela, prvenstveno motorskih veličina kako je pomenuto u prethodnim poglavljima.

4.4.5 Zaključna razmatranja

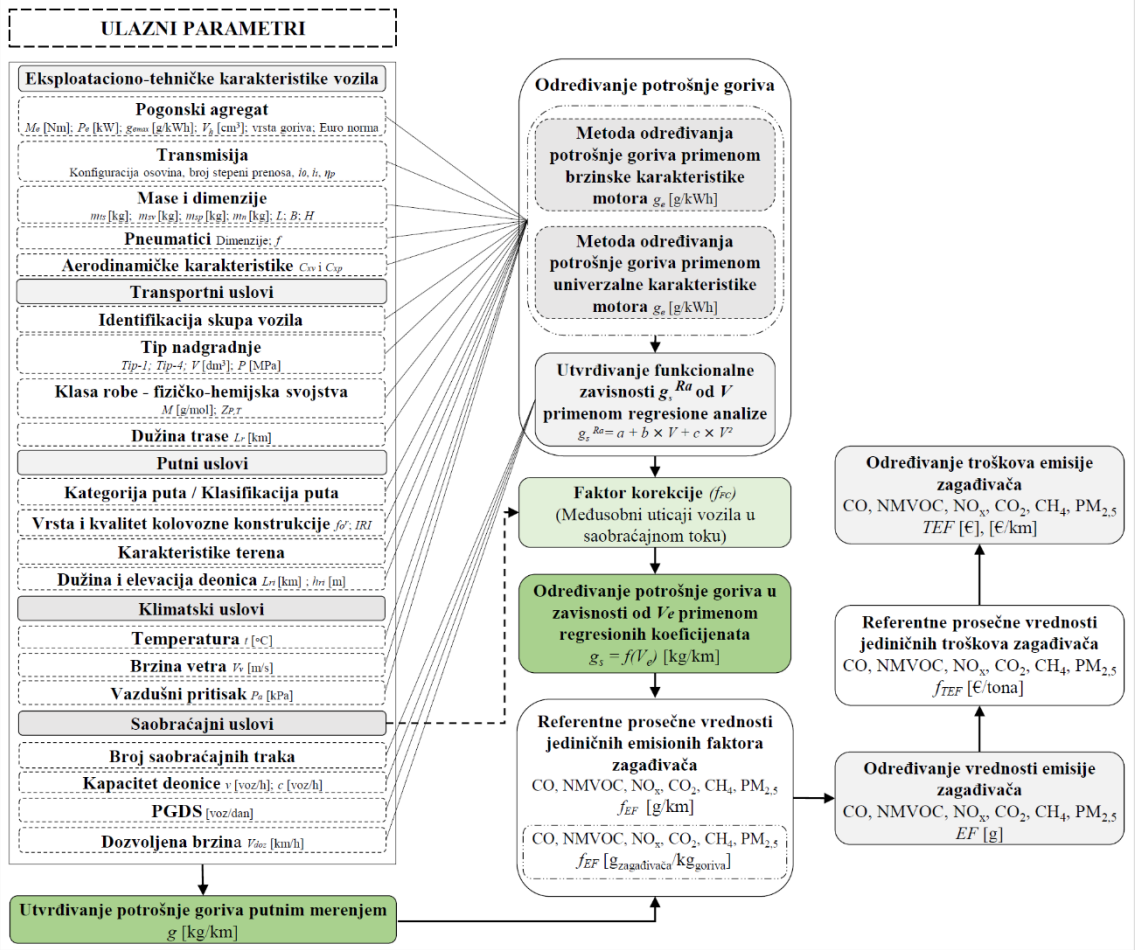
Rezultati sprovedenog istraživanja ukazuju da model, prikazan na Slici 18., pruža jasan osnov za pouzdano utvrđivanje potrošnje goriva, pritom sagledavajući uticaje koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, uslova eksploatacije i fizičko–hemijskih svojstava gasa koji se transportuje. Ostvareni rezultati prikazuju da razvijeni model omogućava sveobuhvatnu procenu potrošnje goriva za definisane uslove eksploatacije, pri čemu se kao značajni parametri mogu izdvojiti karakteristike pogonskih agregata, masena opterećenja, konfiguracija terena, uslovi saobraćaja i međusobni uticaji vozila u saobraćajnom toku na režim kretanja, odnosno na potrošnju goriva. Takođe, model uzima u obzir uticaje tipa nadgradnje i tehničkih karakteristika posuda, uključujući radnu zapreminu i pritisak, materijale izrade, temperaturne uslove tokom punjenja, fizičko–hemijska svojstva gasa i faktor kompresibilnosti. Stoga, razvijeni model obezbeđuje pouzdanu osnovu za dalje uporedne analize teretnih vozila za različitim tipovima nadgradnji i sa različitim vrstama pogonskih goriva.

Važno je istaći i ograničenja modela, koja se prvenstveno ogledaju u dostupnosti i kvalitetu ulaznih podataka, a od kojih u velikoj meri zavisi i tačnost izlaznih rezultata procene. U navedenom kontekstu, moguća odstupanja između procenjenih i realnih vrednosti potrošnje goriva mogu biti i posledica uticajnih parametara koji nisu u potpunosti obuhvaćeni modelom, poput uticaja vozača na brze dinamičnije promene režima kretanja i dr. Međutim, imajući u vidu složenost razmatrane oblasti, koja je praćena velikim brojem ulaznih parametara, potrebno je naglasiti da razvijeni model predstavlja aproksimaciju realnih uslova vožnje i da je kao takav otvoren za dalja unapređenja. Dalja unapređenja ogledaju se kroz primenu dodatnih faktora korekcije sa kojima se mogu opisati parametri koji nisu u potpunosti obuhvaćeni modelom, a koji mogu doprineti analizi što realnijih uslova vožnje. Osim navedenog, uz određena prilagođavanja moguća je i primena na ostale kategorije vozila, klase opasne robe ali i ostale vrste ugljovodoničnih goriva. Pored navedenog, važno je ukazati na činjenicu da je model razvijen na osnovu početnih ciljeva i motiva ovog istraživanja, a koji se odnose na moguća unapređenja procesa transporta prirodnog gasa u Republici Srbiji sa posebnim naglaskom na fleksibilnost transporta i funkcionalnu primenljivost tehnologije. U navedenom kontekstu, posebna pažnja je posvećena primeni novih materijala, čijom upotrebom bi se unapredila efikasnost procesa transporta gasa, kao i izboru pogonskih goriva u skladu sa stanjem i razvijenošću postojeće infrastrukture.

5. Model procene emisije i troškova emisije izduvnih gasova vozila

5.1 Opis modela

U ovom poglavlju opisan je model za procenu izduvne emisije, faktora emisije *(EF)* zagađivača (CO, NMVOC, NO_x, CO_2, CH_4 i $PM_{2,5}$) i njihovih troškova kod vozila i nadgradnji namenjenih za transport gasova. Model prikazan na Slici 40., predstavlja sveobuhvatan pristup proceni izduvne emisije u funkciji potrošnje goriva, pritom uzimajući u obzir i uticaje koji potiču od: eksploatacione–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, transportnih, putnih, klimatskih i saobraćajnih uslova eksploatacije.



Slika 40 Model procene emisije i troškova emisije izduvnih gasova vozila *(Vašalić i ostali, 2024)*

U zavisnosti od početnih zahteva, raspoloživih podataka i zahtevane tačnosti, postupak procene faktora emisije *EF* zagađivača (CO, NMVOC, NO_x, CO_2, CH_4 i $PM_{2,5}$) i njihovih troškova *TEF*, moguće je sprovesti na dva načina. Prvi način uključuje podatke dobijene metodama direktnog merenja u realnim uslovima vožnje, što je detaljno opisano u Poglavljima 3 i 4. Drugi način uključuje podatke o potrošnji goriva dobijene primenom metoda za određivanje potrošnje goriva, zasnovanih na pogonskim karakteristikama motora. Postupak određivanja potrošnje detaljno je opisan u prethodnom poglavlju, uz određena proširenja koja se odnose na parametre

o pogonskom agregatu, tj. vrstu pogonskog goriva, način obrazovanja smeše, emisione norme, sistem za naknadni tretman izduvnih gasova.
Nakon selekcije i izbora ulaznih parametara i određivanja potrošnje goriva za razmatrana vozila, u sledećoj fazi modela pristupa se utvrđivanju zavisnosti izduvne emisije, tj. faktora emisije *EF* zagađivača od potrošnje goriva. Vrednosti *EF* zagađivača za razmatrane skupove vozila određene su na osnovu referentnih prosečnih vrednosti faktora emisije zagađivača f_{EF}^{k}, usvojenih na osnovu podataka iz Uputstva za popis emisije izduvnih gasova izdatog od Evropske agencije za životnu sredinu *(engl. European Environment Agency)* (EEA, 2019; EEA, 2023) i iz istraživanja (Ivković, 2012; Guo et al., 2014; Anderson, 2015; Quiros et al., 2016, 2017; Wang, Gui, Yang, Yu, Zhang, and Liu, 2022; Zheng, Zhang, Yin, Fu, Jiang, Li, and Ding, 2022). Bitno je naglasiti da postoje modeli (softverska rešenja) za određivanje – procenu izduvne emisije gasova koji potiču od drumskog saobraćaja. Jedno od postojećih rešenja su program COPERT *(engl. Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport)* zasnovan na Uputstvo za popis emisije izduvnih gasova i program HBEFA zasnovan na Priručniku o emisionim faktorima zagađivača koji potiču od drumskog saobraćaja *(engl. Handbook Emission Factors for Road Transport)* (EEA, 2019; EEA, 2023; HBEFA, 2025). Ključna razlika između predloženog modela i prethodnih istraživanja (softverskih rešenja), ogleda se u razmatranju uticaja uslova eksploatacije na promenu masenih parametra, odnosno potrošnju goriva i izduvnu emisiju. Drugim rečima, razmatraju se uticaji uslova eksploatacije vozila i nadgradnji na količinu transportovanog gasa po vožnji i potrebne zapreminske kapacitete u odnosu na zahtevane količinu robe (gasa), pri čemu se njihova kvantifikacija sprovodi preko potrošnje goriva i izduvne emisije.

Naime, kako je prethodno napomenuto u zavisnosti od početnih zahteva, raspoloživih podataka i zahtevane tačnosti, model pruža mogućnost selekcije referentnih prosečnih vrednosti faktora emisije zagađivača f_{EF}^{k}. Prvi pristup uključuje prosečne vrednosti emisionih faktora koje su utvrđene za sve kategorije vozila na osnovu statističkih podataka o potrošnji goriva. Vrednosti emisionih faktora zagađivača izražene su u gramima zagađivača po kilogramu sagorelog goriva (EEA, 2019; EEA, 2023). Drugi pristup uključuje podatke o prosečnim vrednostima emisionih faktora zagađivača utvrđene za sve kategorije vozila na osnovu vrste goriva, masenih parametara i primenjenih tehnologija naknadnog tretmana izduvnih gasova (emisionih normi), izražene u gramima zagađivača po kilometru pređenog puta (Guo et al., 2014; Anderson, 2015; Quiros et al., 2016 i 2017; EEA, 2019; Wang et al., 2022; Zheng et al., 2022; EEA, 2023).

Nakon određivanja potrošnje goriva i odabira referentnih vrednosti faktora emisije zagađivača, u sledećoj fazi modela, određuju se vrednosti izduvne emisije zagađivača koje emituju vozila i nadgradnje namenjene za transport gasova. Emisija zagađivača, grupisana je u prekursore ozona (CO, NO_x i NMVOC), gasove koji stvaraju efekat staklene bašte (CO_2 i CH_4) i čvrste čestice ($PM_{2,5}$). Konačne vrednosti izduvne emisije koju emituju vozila i njihove nadgradnje, moguće je prikazati u odlasku i povratku na svakoj deonici trase ili kao ukupne vrednosti na celoj dužini trase. Važmo je i istaći da model pruža mogućnosti procene emisije u odnosu na transportovane količine gasa, potrebne zapreminske kapacitete i broj vožnji koji su neophodni za realizaciju zahteva. Kalibracija modela izvršena je korektivnim faktorima povećanja potrošnje goriva, sa kojima su obuhvaćeni međusobni uticaji vozila u saobraćajnom toku, način upravljanja vozilom i dr., (Kuzović, 1994), navedeno u Poglavlju 4.

U poslednoj fazi modela, na osnovu prethodno određenih vrednosti izduvne emisije zagađivača i primenom referentnih prosečnih vrednosti jediničnih troškova zagađivača f_{TEF}, određuju se vrednosti troškova izduvne emisije *TEF*. Referentne vrednosti jediničnih troškova zagađivača f_{TEF} usvojene su na osnovu baze podataka o procenama eksternih troškova za saobraćajni

sektor, definisanih u okviru projekta NEEDS *(engl. New Energy Externalities Development for Sustainability)* izdatog od Evropske komisije *(engl. European Commission)* (Preiss, Friedrich, and Klotz, 2008) i istraživanja (IWG 2016, 2021; Schucht, Real, Létinois, Colette, Holland, Spadaro, Opie, Brook, Garland, Gibbs, Calero, Zeiger, Rouïl, Brignon, and German, 2020; IPCC, 2007, 2021). Razvijeni model odlikuje visoka fleksibilnost, tj. mogućnost primene na ostale kategorije vozila, kao i na ostale vrste zagađivača koji potiču od sagorevanja ugljovodoničnih goriva. Pored navedenog, modelom je otvorena mogućnost analize troškova goriva, a uz određena prilagođavanja i primena na ostale klase opasne robe, pre svega tečnosti. Takođe, bitno je istaći i činjenicu da vrednosti emisije zagađivača i njenih troškova moguće odrediti i u funkciji pređenog puta.

5.1.1 Utvrđivanje vrednosti faktora emisije zagađivača

Kako je u prethodnom odeljku navedeno, u zavisnosti od početnih zahteva, raspoloživih podataka i usvojenih referentnih prosečnih vrednosti faktora emisije zagađivača f_{EF}^{k}, vrednosti *EF* zagađivača (CO, NMVOC, NO_x, CO_2, CH_4 i $PM_{2,5}$) mogu se odrediti primenom izraza [1.42]:

$$EF^{i,n,k} = g_s^{\ k} \times f_{EF}^{\ k} \times L_r \times N_r^{\ i,n} \quad [g] \qquad [1.42]$$

gde su: $EF^{i,n,k}$ – faktor emisije zagađivača [g], i – identifikacija skupa vozila, n – identifikacija nadgradnje (tip nadgradnje), k – vrsta goriva, $g_s^{\ k}$ – određena specifična potrošnja goriva [kg/km], $f_{EF}^{\ k}$ – referentne vrednosti faktora emisije zagađivača [g/kg], L_r – dužina trase [km], $N_r^{\ i,n}$ – broj vožnji.

Prvi pristup se zasniva na referentnim prosečnim vrednostima $f_{EF}^{\ k}$ za kategorije lakih i teških teretnih vozila, utvrđenim u odnosu na vrstu pogonskog goriva, prikazanim u Tabeli 34. Navedene vrednosti dobijene su na osnovu statističkih podataka o potrošnji goriva, voznim parkovima i saobraćajnim aktivnostima država članica Evropske unije (EU).

Tabela 33. Prosečne vrednosti faktora emisije zagađivača za teretna vozila u zavisnosti od vrste pogonskog goriva [g/kg]

Kategorija vozila	Pogonsko gorivo	Faktori emisije $f_{EF}^{\ k}$ [$g_{zagađivača}/kg_{goriva}$]						
		Vrednosti	CO	NMVOC	NO_x	CO_2	CH_4	$PM_{2,5}$
Laka teretna vozila ≤ 3,5t	Benzin	Prosečna	118,70	7,42	5,93	3168,00	0,22	0,020
		Min	11,75	0,67	0,33		0,03	0,005
		Max	225,65	14,17	11,53		0,41	0,035
Laka teretna vozila ≤ 3,5t	Dizel	Prosečna	6,81	1,23	13,48	3169,00	0,02	1,220
		Min	4,82	0,48	10,43		0,01	0,002
		Max	8,80	1,98	16,53		0,03	2,438
Teška teretna vozila	Dizel	Prosečna	6,10	0,90	25,95	3180,00	0,23	0,550
		Min	2,79	0,13	10,48		0,02	0,015
		Max	9,41	1,67	41,42		0,44	1,085
Teška teretna vozila	KPG[1]	Prosečna	3,98	0,14	17,10	2790,00	2,15	0,020
		Min	2,20	0,06	9,67		1,43	0,019
		Max	5,76	0,22	24,53		2,87	0,021

Izvor:
EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 – Update 2024;
EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 – Update 2020;

[1]Vrednosti obuhvataju autobuse na komprimovani prirodni gas.
[2] Za zagađivač CO_2 navedene su prosečne vrednosti emisije koje se ostvariju po kategorijama.

Važno je istaći da se vrednosti navedene u Tabeli 34. odnose i na vozila opremljena sa starijim tehnologijama tretmana izduvnih gasova. Na ovaj način omogućena je primena podataka i u

državama koje u voznim parkovima imaju veći udeo starijih vozila. Najveće vrednosti prikazane u Tabeli 34. odgovaraju vozilima sa starijim tehnologijama, dok najmanje vrednosti odgovaraju tehnologijama dostupnim od 2010. godine, tj. Euro V normama (EEA, 2019; EEA, 2023).

Drugi pristup zasniva se na referentnim prosečnim vrednostima f_{EF}^{k} za kategorije teretnih vozila i autobusa, utvrđenim u odnosu na vrstu pogonskog goriva, najveću dozvoljenu masu vozila i emisionu normu, dato u Tabeli 35. Navedene vrednosti, izražene u gramima zagađivača po kilometru pređenog puta, dobijene na osnovu brojnih statističkih podataka, poput prosečne brzine kretanja, pređenog puta, ambijentalne temperature i dr. (EEA, 2019; EEA, 2023). Primena ovog pristupa omogućava kategorizaciju referentnih vrednosti f_{EF}^{k} i usmereniji izbor u odnosu na vrstu pogonskog goriva, masene parametre i primenjenu tehnologiju tretmana izduvnih gasova, čime je omogućeno preciznije utvrđivanje faktora emisije zagađivača. Sa stanovišta predmetnog istraživanja, takođe, važno je istaći da su procenjene vrednosti faktora emisije zagađivača dobijene primenom prvog pristupa više u odnosu na vrednosti dobijene primenom drugog pristupa.

Tabela 34. Prosečne vrednosti faktora emisije zagađivača za teretna vozila u zavisnosti od vrste pogonskog goriva i primenjene tehnologije [g/km]

Kategorija vozila	Pogonsko gorivo	Emisiona norma	Faktori emisije f_{EF}^{k} [g/km]				
			CO	NMVOC	NO_x	CO_2	$PM_{2,5}$
Teretna vozila ≤ 20t	Dizel	Euro IV	0,644	0,034	3,525	565,270	0,0026
Teretna vozila ≤ 20t	Dizel	Euro V	0,116	0,030	3,035	542,019	0,0024
Teretna vozila ≤ 20t	Dizel	Euro VI	0,114	0,022	0,315	541,063	0,0023
Teretna vozila ≤ 28t	Dizel	Euro IV	0,794	0,042	4,503	734,012	0,0343
Teretna vozila ≤ 28t	Dizel	Euro V	0,367	0,040	3,397	714,666	0,0319
Teretna vozila ≤ 28t	Dizel	Euro VI	0,167	0,027	0,339	713,332	0,0032
Skupovi vozila ≤ 40t	Dizel	Euro IV	0,875	0,047	5,195	829,132	0,0386
Skupovi vozila ≤ 40t	Dizel	Euro V	0,542	0,044	3,503	819,353	0,0312
Skupovi vozila ≤ 40t	Dizel	Euro VI	0,150	0,029	0,338	814,921	0,0041
Autobusi	KPG	EEV	0,793	0,029	3,451	980,325	0,0096
Referentne prosečne vrednosti zagađivača CH_4 [mg/km]							
			Režim vožnje				
Kategorija vozila	Pogonsko gorivo	Emisiona norma	Grad	Vangradski		Auto–put	
Teretna vozila ≤ 16t	Benzin	Sve tehnologije	140	110		70	
Teretna vozila ≤ 16t	Dizel	Euro IV, V i VI	2,6	1,6		1,2	
Teretna vozila ≥ 16t	Dizel	Euro IV, V i VI	5,3	5,6		4,2	
Autobusi	KPG	EEV	980				

Izvor:
EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 – Update 2024;
EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 – Update 2020;

KPG – Komprimovani prirodni gas;
EEV – Enhanced Environmentally Vehicles za teška teretna vozila sa pogonom na gasovita goriva (KPG).

U pogledu određivanja izduvne emisije vozila sa pogonom na gasovita goriva, potrebno je razmotriti brojne parametre koji utiču na izduvnu emisiju, poput fizičko–hemijskih karakteristika goriva, konstruktvnih karakteristika motora, načina obrazovanja smeše, primenjene tehnologije naknadnog tretmana izduvnih gasova i dr. (navedeno u Poglavljima 3 i 4). Vrednosti izduvne emisije vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas, moguće je odrediti primenom referentnih prosečnih vrednosti f_{EF}^{k} datih u Tabeli 36. ili primenom podataka iz prethodnih istraživanja, utvrđenih putnim merenjima za razmatrane kategorije vozila, pogonska goriva, primenjene tehnologije naknadnog tretmana izduvnih gasova i dr. (Guo et al., 2014; Anderson, 2015; Quiros et al., 2016, 2017; Wang et al., 2022; Zheng et al., 2022).

Izbor referentnih prosečnih vrednosti f_{EF}^{k}, pre svega, u zavisnosti je od početnih zahteva, raspoloživih podataka i zahtevane tačnosti. Sledom navedenog, uzimajući u obzir prethodno

navedene parametre koji utiču na izduvnu emisiju (detaljno opisane u Poglavljima 3 i 4), usvojene referentne prosečne vrednosti f_{EF}^{k} za razmatrana vučna vozila sa pogonom na dizel i komprimovani prirodni gas, navedene su u Tabeli 36.

Tabela 35. Prosečne vrednosti faktora emisije zagađivača za teretna vozila u zavisnosti od vrste pogonskog goriva i primenjene tehnologije [g/km]

Kategorija vozila	Pogonsko gorivo / Primenjena tehnologija	Način obrazovanja smeše	Faktori emisije f_{EF}^{k} [g/km]					
			CO	NMVOC	NO_x	CO_2	CH_4	$PM_{2,5}$
Teška teretna vozila 26–40t	Dizel / DOC + DPF	λ>1	0,875	0,047	5,195	829,132	0,178	0,039
Teška teretna vozila 26–40t	Dizel / DOC + DPF + SCR	λ>1	0,150	0,029	0,338	824,921	0,175	0,004
Teška teretna vozila 26–40t	KPG / TWC	$\lambda\approx1$	0,800	0,030	3,510	989,325	0,997	0,001

Izvor:
[1] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 – Update 2024;
[2] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 – Update 2020;
[3] Quiros et al., 2016. Real-world emissions from modern heavy-duty diesel, natural gas, and hybrid diesel trucks operating along major California freight corridors;
[4] Quiros et al., 2017. Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport;
[5] Zheng et al., 2022. Evaluation of real-world emissions of China V heavy-duty vehicles fueled by diesel, CNG and LNG on various road types;
[6] Wang et al., 2022. Real-world gaseous emission characteristics of natural gas heavy-duty sanitation trucks;

DOC – Dizel oksidacioni katalizator;
SCR – Selektivna katalitička redukcija;
TWC – Trostepeni katalizator;
λ – koeficijent viška vazduha.

Za potrebe istraživanja, konverzija referentnih vrednosti f_{EF}^{k} u grame zagađivača po kilogramu sagorelog goriva, izvršena je na osnovu prosečnih vrednosti potrošnje goriva po kategorijama vozila g^{k} [kg/km] date u Uputstvu (EEA, 2023). Primenom izraza [1.43] i vrednosti iz Tabela 35 i 36, određene su vrednosti faktora emisije zagađivača $EF^{i,n,k}$.

$$m_g^{\,k} = g_s^{\,k} \times L_r \quad [kg]$$

$$EF^{i,n,k} = m_g^{\,k} \times f_{EF}^{\,k} \times L_r \quad [g] \qquad [1.43]$$

gde su: $f_{EF}^{\,k}$ – referentne vrednosti faktora emisije zagađivača [g/kg], $m_g^{\,k}$ – određena utrošena masa goriva na trasi [kg], L_r – dužina trase [km], i – identifikacija skupa vozila, n – tip nadgradnje, k – vrsta goriva.

5.1.2 Utvrđivanje jediničnih troškova zagađivača

Poslednjih decenija vodeće države sveta, kao odgovor na izazove klimatskih promena i globalnog zagrevanja, preduzimaju odlučne korake ka transformaciji energetskih sektora i sektora privrede sa dosadašnjih konvencionalnih energenata (fosilnih goriva) na ekološki prihvatljivije energente. U navedenom kontekstu, sektori privrede prepoznati su kao jedni od najvećih zagađivača i kao takvi prolaze ili su u procesu tranzicije sa dosadašnjih konvencionalnih fosilnih goriva (uglja i nafte) na ekološkiih prihvatljivije energente, prirodni gas ili energente dobijene iz obnovljivih izvora (IEA, 2023; Strategija, 2024). Postupci sprovođenja odluka o tranzicionim procesima i pravcima razvoja, definisani su brojnim strateškim dokumentima i zakonskim propisima, i često su podržani sa mehanizmima za oporezivanje izduvne emisije. Pre svega, pomenuti zakonski propisi i mehanizmi za oporezivanje imaju za cilj regulisanje brzine tranzicije, tj. smanjenje podsticaja za korišćenje konvencionalnih energenata uz povećanje podsticaja za primenu ekoloških prihvatljivijih i energenata dobijenih iz obnovljivih izvora (IEA, 2023; Strategija, 2024).

Kao podrška mehanizmima oporezivanja u Evropskoj uniji i svetu, realizovana su brojna istraživanja sa ciljem definisanja i procene negativnih uticaja emisije zagađujućih materija poreklom od privrednih sektora (industrije, poljoprivrede, domaćinstva, saobraćaja i dr.). U navedenom kontekstu, najznačajnija istraživanja zasnovana na utvrđivnju eksternih troškova u privrednim sektorima, uključujući i saobraćajni sektor, su: CAFE *(engl. Clean Air For Europe)*, NEWEXT *(engl. New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies)*, ExternE *(engl. Externel Costs of Energy)*, HEATCO *(engl. Developing harmonised European approaches for transport costing and project assessment)*, CASES *(engl. Cost Assessment for Sustainable Energy Systems)*, NEEDS *(engl. New Energy Externalities Developments for Sustainability)*, GAINS *(engl. Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies)* (EC, 2001, 2003, 2005, 2006, 2008, 2009; IIASA, 2011). Jedan od načina kvantifikacije negativnih uticaja emisije zagađujućih materija na zdravlje ljudi, životnu sredinu, biodiverzitet i ekosisteme, klimatske promene, materijalna dobra i ukupnu društvenu dobrobit, je kroz primenu eksternih troškova, tj. jediničnih troškova zagađivača. Jediničnim troškovima zagađivača data je osnova za procenu posledica izazvanih od izduvnih emisija zagađujućih materija poreklom od privrednih sektora.

Rezultati navedenih istraživanja CAFE, NEWEXT, ExternE, HEATCO, CASES, NEEDS i dr. (EC, 2001, 2003, 2005, 2006, 2008, 2009; IIASA, 2011) iskorišćeni su kao osnova za formiranje brojnih baza podataka, priručnika i izveštaja sa procenjenim vrednostima troškova zagađivača poreklom od privrednih sektora (industrije, poljoprivrede, domaćinstva, saobraćaja i dr.) (Preiss et al., 2008; Amann, Bertok, Borken-Kleefeld, Cofala, Heyes, Höglund-Isaksson, Klimont, Nguyen, Posch, Rafaj, Sandler, Schöpp, Wagner, Winiwarter, 2011; Van Essen, Van Wijngaarden, Schroten, Sutter, Bieler, Maffii, and El Beyrouty, 2019; Schucht et al., 2020; EEA, 2024). Kako je u prethodnom odeljku rada pomenuto, referentne vrednosti jediničnih troškova zagađivača f_{TEF} (CO, NMVOC, NO_x, CO_2, CH_4 i $PM_{2,5}$) za Republiku Srbiju, usvojene su na osnovu baze podataka o procenama eksternih troškova za sve privredne sektore, uključujući i saobraćajni sektor, koje su razvijene u okviru projekta NEEDS (Preiss et al., 2008; EC, 2009) i istraživanja (IWG 2016, 2021; Schucht et al., 2020; IPCC, 2007, 2021).

U Tabeli 37. prikazane su usvojene referentne vrednosti jediničnih troškova zagađivača f_{TEF} izražene u evro po toni emitovanog zagađivača za projekcioni period do 2030. godine. Referentne vrednosti jediničnih troškova zagađivača CO i gasove koji stvaraju efekat staklene bašte (CO_2 i CH_4), određene su na osnovu njihovog udela u GWP *(engl. Global warming potential)*, primenom izraza [1.44]:

$$f_{TEF\,CO} = GWP_{CO} \times f_{TEF\,CO_2} \quad \left[€ / t\right] \qquad [1.44]$$

gde su: $f_{TEF\,CO}$ – jedinični trošak zagađivača CO [€/t], $f_{TEF\,CO_2}$ – referentna vrednost jediničnog troška zagađivača CO_2 [€/t], GWP_{CO} – udeo zagađivača CO u globalnom zagrevanju u poređenju sa CO_2 u odnosu na određeni vremenski period.

Tabela 36. Prosečne vrednosti jediničnih troškova zagađivača [€/t]

	Jedinični troškovi zagađivača f_{TEF} [€/$t_{emitovanog\ zagađivača}$]						
	Godina	CO	NMVOC	NO_X	CO_2	CH_4	$PM_{2,5}$
Procenjeni jedinični troškovi zagađivača	2020	117	590	10547	39	1092	27056
	2022	123	608	10892	41	1148	27984
	2024	129	628	11248	43	1204	28943
	2026	135	648	11616	45	1260	29936
	2028	141	668	11997	47	1316	30962
	2030	147	690	12392	49	1372	32024

GWP – Global warming potential

Procenjeni udeo zagađivača	CO_2	CH_4	CO
Kumulativni efekat tokom perioda od 100 godina	1	28	3

Izvor:
[1] IPCC, 2007 – Climate change 2007: The physical science basis;
[2] NEEDS, 2008 – Report on the procedure and data to generate averaged/aggregated data (Deliverable No. 1.1, RS-3a);
[3] IWG, 2016 – Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis under Executive Order 12866;
[4] Schucht et al., 2020 – Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2017. Eionet Report ETC/ATNI No 2020/4;
[5] IWG, 2021 – Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis under Executive Order 13990;
[6] IPCC, 2021 – Climate change 2021: The physical science basis.

Važno je istaći, da se referentne vrednosti za Republiku Srbiju mogu usvojiti i na osnovu priručnika i izveštaja za procenu eksternih troškova (Amann et al., 2011; Van Essen et al., 2019; Schucht et al., 2020; EEA, 2024), uz određena prilagođavanja. Naime, ukoliko za razmatranu državu ne postoje direktni podaci o eksternim troškovima pojedinih privrednih sektora, referentne vrednosti mogu se proceniti ponderisanjem prosečnih vrednosti troškova zagađivača država članica Evropske unije sa bruto domaćim proizvodom po stanovniku ili brojem stanovnika razmatrane države (Ivković, 2012). Takođe, primenom korektivnih faktora prikazanih u Tabeli 38, kao i srednjih ukupnih vrednosti troškova zagađivača država članica Evropske unije i Republike Srbije navedenih u istraživanjima (Amann et al., 2011; Van Essen et al., 2019; Schucht et al., 2020; EEA, 2024), moguće je proceniti negativne uticaje od pojedinih privrednih sektora (industrije, poljoprivrede, domaćinstva, saobraćaja i dr.) na zdravlje ljudi, useve, biodiverzitet i ekosisteme.

Tabela 37. Korektivni faktori jediničnih troškova zagađivača u odnosu na privredne sektore

Država	Privredni sektori	Korektivni faktori jediničnih troškova zagađivača		
		NMVOC	NO_X	$PM_{2,5}$
Evropska unija	Industrija	0,99	0,99	0,73
	Poljoprivreda	0,94	0,99	0,29
	Drumski saobraćaj	0,97	1,01	1,08
	Pomorski/rečni saobraćaj	1,00	0,97	1,57
	Vazdušni saobraćaj	1,00	1,21	1,64
Republika Srbija	Industrija	1,00	1,00	0,60
	Poljoprivreda	1,00	1,00	0,64
	Drumski saobraćaj	1,00	1,00	0,88
	Rečni saobraćaj	1,00	1,00	1,22
	Vazdušni saobraćaj	1,00	1,00	1,35

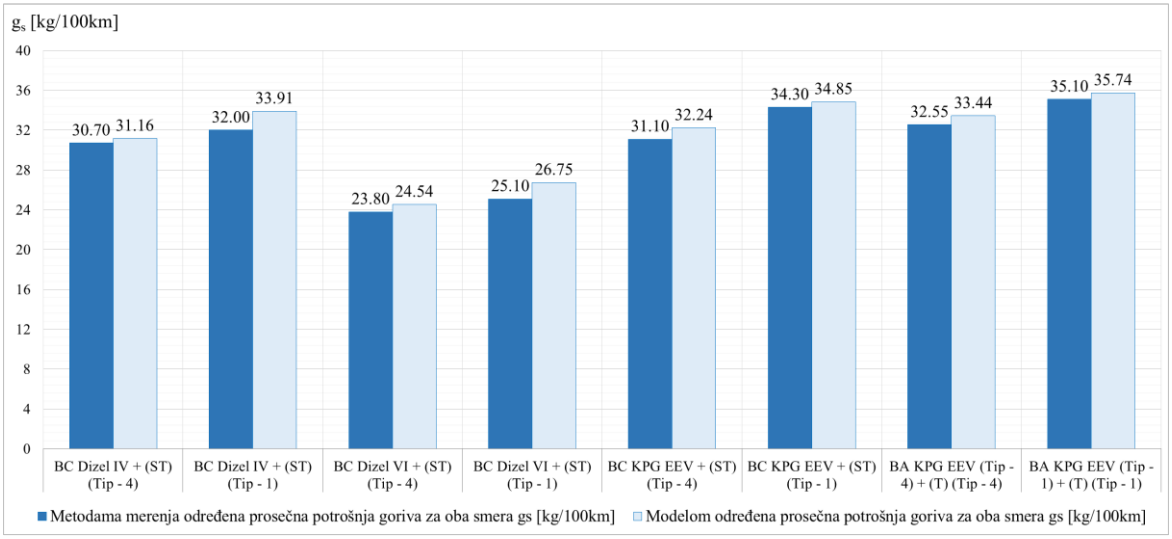
Izvor:
[1] Amann et al., 2011. – Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications;
[2] Van Essen et al., 2019. – Handbook on the external costs of transport;
[3] Schucht et al., 2020. – Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2017. Eionet Report ETC/ATNI No 2020/4;
[4] EEA, 2024. The costs to health and the environment from industrial air pollution in Europe – 2024 update.

Zajednički cilj svih modela zasnovanih na procenama emisije zagađujućih materija i njihovih troškova poreklom od privrednih sektora je kvantifikacija njihovog negativnog uticaja na zdravlje ljudi, životnu sredinu, klimatske promene, biodiverzitet i ekosisteme. U slučaju saobraćajnog sektora, odgovor na pomenute negativne uticaje prati kontinuirani razvoj u oblasti vozila, kroz unapređenja postojećih i uvođenje savremenih tehnologija u konstruciju vozila, motor i sisteme za naknadni tretman izduvnih gasova. Takođe, paralelno sa navedenim, sprovode se i postepena zaoštravanja dozvoljenih granica izduvne emisije gasova, definisana emisionim propisima što je navedeno u Poglavlju 3.

5.1.3 Rezultati modela

U nastavku ovog odeljka, prikazani su rezultati primene predloženog modela. Proračun količine izduvne emisije (CO, NMVOC, NO_x, CO_2, CH_4 i $PM_{2,5}$) i njenih troškova, izvršen je za skupove vozila prikazane na Slici 35., detaljno objašnjeno u Poglavljima 3 i 4. Rezultati modela procene izduvne emisije i troškova emisije prikazani su u odnosu na vrednosti potrošnje goriva utvrđene putnim merenjem, kao i potrošnje goriva određene primenom modela, za pravce odlaska i povratka na razmatranoj trasi. Prilikom analize uzeti su u obzir isti eksploataciono–tehnički parametri vozila i nadgradnji, poput masa, ambijentalne temperature, količine transportovanog gasa po tipu nadgradnje i dr., čime je obezbeđeno što približnije poređenje sa realnim uslovima eksploatacije. Prvenstveno uzeti su u obzir temperaturni uslovi, koji su važili u trenutku merenja potrošnje goriva, kao i njihov uticaj na količine transportovanog gasa po skupu vozila, što je prikazano u Tabeli. 32. Razmatrana trasa obuhvata gradske i međugradske deonice, odnosno vozne uslove koji obuhvataju česte promene brzine kretanja i vožnju na otvorenom putu, dato u Poglavlju 4.

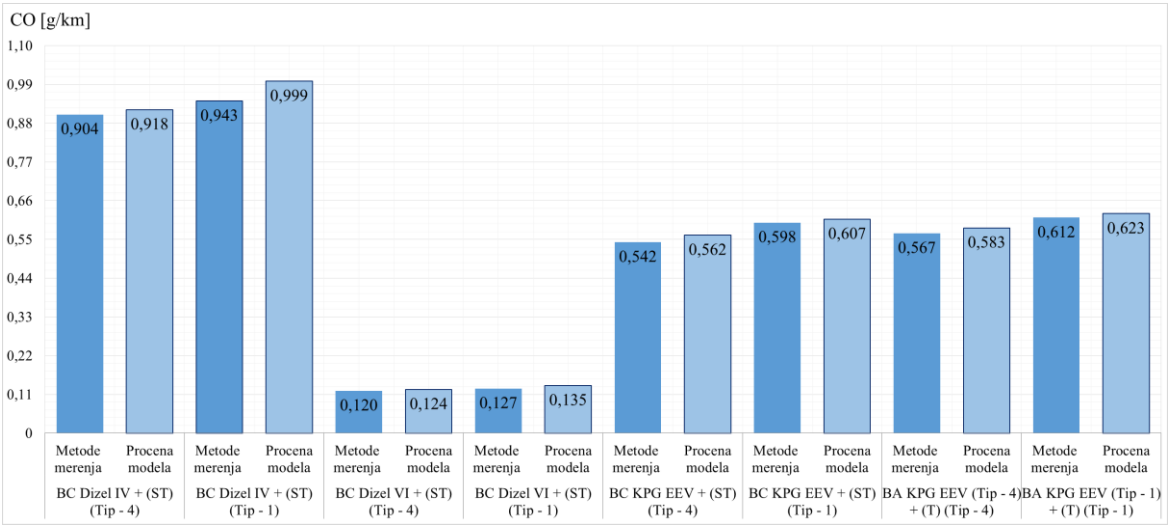
Rezultati izduvne emisije i pripadajućih troškova (CO, NO_x, NMVOC, CO_2, CH_4 i $PM_{2,5}$) prikazani na Slikama (41, 42, 43, 44, 45, 46 i 47) određeni su primenom modela, za ulazne parametre potrošnje goriva dobijene putnim merenjem i primenom modela. Verifikacija dobijenih rezultata, kao i procena njihove tačnosti u pogledu predikcije, izvršena je poređenjem sa rezultatima prethodnih istraživanja utvrđenih u realnim uslovima vožnje primenom prenosnih uređaja za merenje izduvne emisije. Rezultati su prikazani za skupove vozila, sa pogonom na dizel gorivo i komprimovani prirodni gas sa dva tipa nadgradnji, posudama izrađenim od čelika (Tip–1) i posudama izrađenim od kompozitnih materijala (Tip–4). Bitno je naglasiti da je poređenje izvršeno isključivo između skupova vozila sa istom vrstom pogonskog goriva (poređenje između vučnih vozila sa pogonom na dizel, odnosno poređenje između vučnih vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas). Na Slici 41. prikazano je poređenje, modelom i putnim merenjem određene, prosečne potrošnje goriva g_s za oba smera (odlazak puno i dolazak prazno). Vrednosti potrošnje goriva g_s za obe vrste goriva, izražene su u kg/100 km.



Slika 41. Prosečne vrednosti potrošnje goriva različitih skupova vozila

Vrednosti potrošnje goriva utvrđene putnim merenjima predstavljaju srednje vrednosti dobijene na osnovu dve metode merenja, opisane u Poglavljima 3 i 4. Potrošnja goriva određena modelom, u poređenju sa srednjim vrednostima potrošnje goriva utvrđenim putnim

merenjem, pokazuje nešto više vrednosti i u proseku odstupa od oko 5% za razmatrane skupove vozila. Slika 42., prikazuje poređenje prosečnih vrednosti emisije CO za oba smera (odlazak puno i povratak prazno) razmatranih skupova vozila. Vrednosti emisije CO određene su primenom modela, na osnovu potrošnje goriva dobijene putnim merenjem i potrošnje goriva izračunate primenom modela.

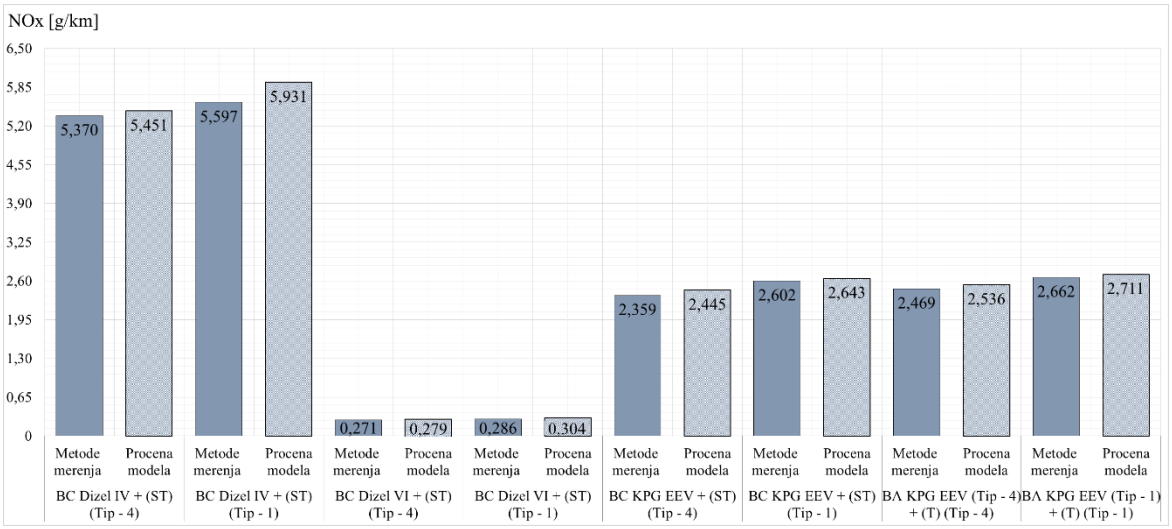


Slika 42. Prosečne vrednosti emisije ugljen–monoksida CO

Rezultati predloženog modela prikazuju da su procenjene vrednosti emisije CO najviše kod vučnih vozila sa pogonom na dizel gorivo i starijim tehnologijama tretmana izduvnih gasova. Visoke vrednosti emisije CO i NO_x (Slika 43.) kod vozila sa starijim tehnologijama, mogu se objasniti neoptimizovanim procesom sagorevanja i izostankom ili ograničenom primenom novih sistema za naknadni tretman izduvnih gasova. Nasuprot navedenom, najniže vrednosti emisije CO i NO_x imaju vozila sa pogonom na dizel gorivo i novijom tehnologijom tretmana izduvnih gasova, tj. tehnologijom koja odgovara emisionoj normi Euro VI. Niže vrednosti emisije CO kod vozila opremljenih novijim tehnologijama, posledica su primene naprednih sistema ubrizgavanja rastvora amonijaka u struju izduvnih gasova, poput sistema selektivne katalitičke redukcije, raznih filtera i dr.

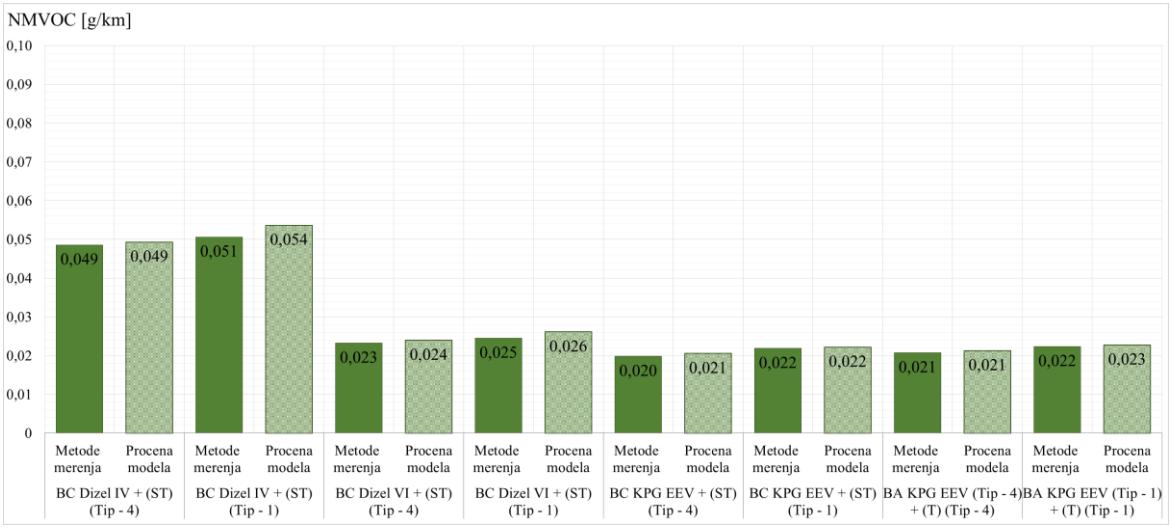
U slučaju ekološki prihvatljivih vozila EEV sa pogonom na komprimovani prirodni gas, koncentracija emisije CO je visoka u poređenju sa dizel vozilima sa novijim tehnologijama. Više vrednosti emisije CO mogu se objasniti neoptimizovanim procesom sagorevanja, kao i izostankom novih sistema za naknadni tretman izduvnih gasova. Naime, kako motori razmatranih vozila rade u oblastima bliskim stehiometrijskoj smeši ($\lambda \approx 1$), svaka odstupanja od stehiometrijskoj odnosa, prvenstveno ka oblastima bogate smeše ($\lambda < 1$), dovode do povećanja emisije CO. U datom kontekstu, razlike u sastavu i vrednostima izduvne emisije, kod oto i dizel motora, mogu se objasniti kao zavisnosti od procesa sagorevanja i načina obrazovanja smeše ali i od primenjene tehnologije tretmana izduvnih gasova. Drugim rečima, razlike su najistaknutije tokom nepotpunog sagorevanja, tj. kada se formiraju razne toksične komponente, među kojima su najzastupljeniji CO i NO_x. Svakako, bitno je napomenuti da na sastav izduvnih gasova utiče i vrsta goriva, tj. broj atoma ugljenika u molekulu kao i ispravnost primenjene tehnologije naknadnog tretmana gasova. Načelno u oblastima siromašne smeše ($\lambda > 1$), svojstveno za dizel motore, koncentracija emisija CO je niska, dok koncentracija može varirati NO_x i predstavlja zavisnost od temperature sagorevanja, primene naknadnih tehnologija tretmana izduvnih gasova i dr. (navedeno u Poglavlju 3).

Na Slici 43. prikazano je poređenje procenjenih prosečnih vrednosti emisije azotnih oksida NO_x za oba smera. Prema rezultatima modela, vrednosti emisije NO_x najniže su kod vozila sa pogonom na dizel gorivo i tehnologijom koja odgovara emisionoj normi Euro VI. S druge strane, najviše vrednosti imaju vozila sa pogonom na dizel gorivo opremljena starijim tehnologijama. Takođe, izrazito visoke vrednosti imaju i ekološki prihvatljiva vozila EEV sa pogonom na komprimovani prirodni gas. Kako je prethodno pomenuto, pored vrste goriva, proces sagorevanja, način obrazovanja smeše ali i temperature sagorevanja, bitno utiču na sastav i vrednosti izduvne emisije kod oto i dizel motora. Pri visokim temperaturama sagorevanja i u oblastima blago sromašne smeše ($\lambda \approx 1{,}05–1{,}1$) koncentracija NO_x raste. Naime, kako se koncentracija kiseonika povećava (postepeno se osiromašuje smeša) dolazi do porasta temperature sagorevanja i koncentracije NO_x. Međutim, daljim osiromašenjem smeše (približavavanje granici upaljivosti) temperatura sagorevanja opada, samim tim opada i koncentracja NO_x (navedeno u Poglavlju 3, Slika 13.).



Slika 43. Prosečne vrednosti emisije azotnih oksida NO_x

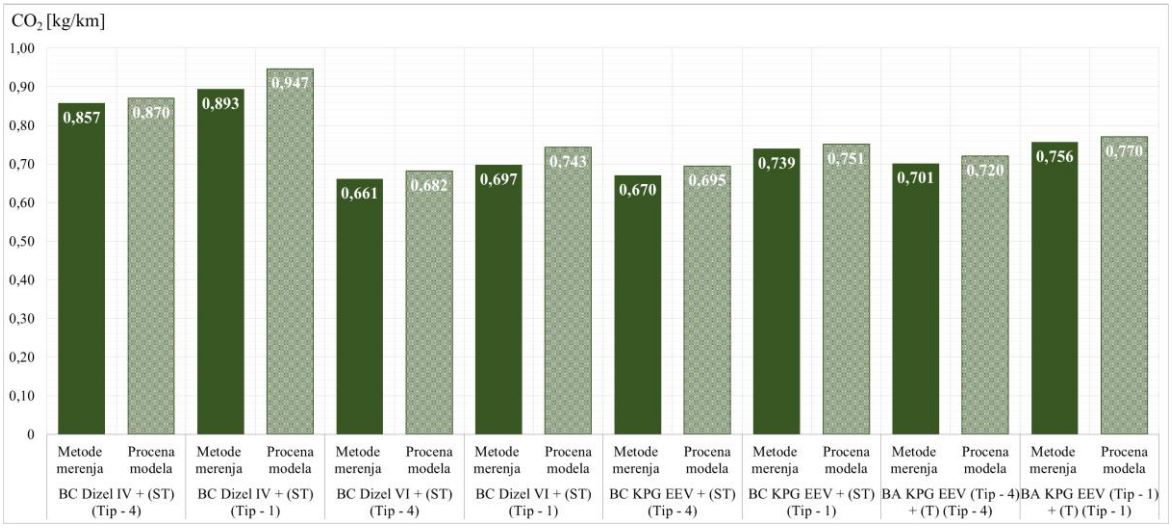
Na Slici 44. prikazano je poređenje prosečnih vrednosti emisije nemetanskih isparljivih organskih jedinjenja NMVOC utvrđenih razvijenim modelom za oba smera, koje emituju razmatrani skupovi vozila.



Slika 44. Prosečne vrednosti emisije nemetanskih isparljivih organskih jedinjenja NMVOC

Rezultati modela ukazuju da najniže vrednosti emisije NMVOC imaju ekološki prihvatljiva vozila EEV, zatim slede vozila sa pogonom na dizel gorivo opremljena novijim tehnologijama i na kraju vozila sa pogonom na dizel gorivo, opremljena starijim tehnologijama tretmana izduvnih gasova. Kao i u prethodnim slučajevima, više vrednosti emisije NMVOC mogu se objasniti nepotpunim sagorevanjem, kao i ograničenom primenom ili efikasnosti sistema za naknadni tretman izduvnih gasova.

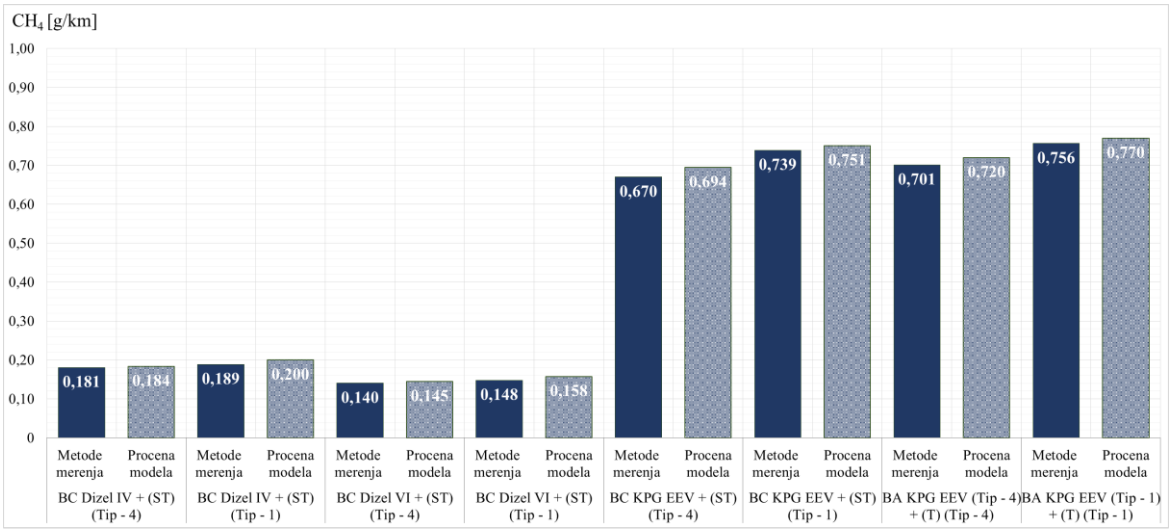
U slučaju emisije ugljen–dioksida CO_2, prikazane na Slici 45., kao i u prethodnim slučajevima rezultati modela prikazuju da najviše vrednosti imaju vozila sa pogonom na dizel gorivo opremljena starijim tehnologijama. S druge strane, vozila pogonom na dizel gorivo opremljena novijim tehnologijama, kao i ekološki prihvatljiva vozila EEV imaju približno iste vrednosti. Navedeni rezultati modela, mogu se objasniti i opisati kao funkcija potrošnje goriva i referentnih vrednosti emisionog faktora CO_2 po jedinici mase sagorelog goriva. Za vozila sa pogonom na dizel, opremljena starijim tehnologijama, primenjene su referentne vrednosti emisionog faktora 2791,69 $g_{zagađivača}/kg_{goriva}$, a za vozila sa novijim tehnologijama, primenjene su vrednosti 2777,51 g/kg. U slučaju vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas, referentne vrednosti su niže i iznose 2154,56 g/kg. Niže referentne vrednosti kod vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas u odnosu na dizel gorivo, posledica su manjeg udela ugljenika u gorivu opisano u Poglavlju 3.2. S druge strane, iako su referentne vrednosti emisionog faktora CO_2 za vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas niže, rezultati modela prikazuju da ukupna emisija CO_2 u pojedinim slučajevima može biti približna ili blago povišena u odnosu na vozila sa pogonom na dizel opremljena novijim tehnologijma. Navedene razlike mogu se objasniti većom specifičnom potrošnjom goriva kod vozila na komprimovani prirodni gas, a koje proističu iz konstruktivnih karakteristika motora i načina obrazovanja smeše (navedeno u poglavlju Poglavlju 3.2).



Slika 45. Prosečne vrednosti emisije ugljen – dioksida CO_2

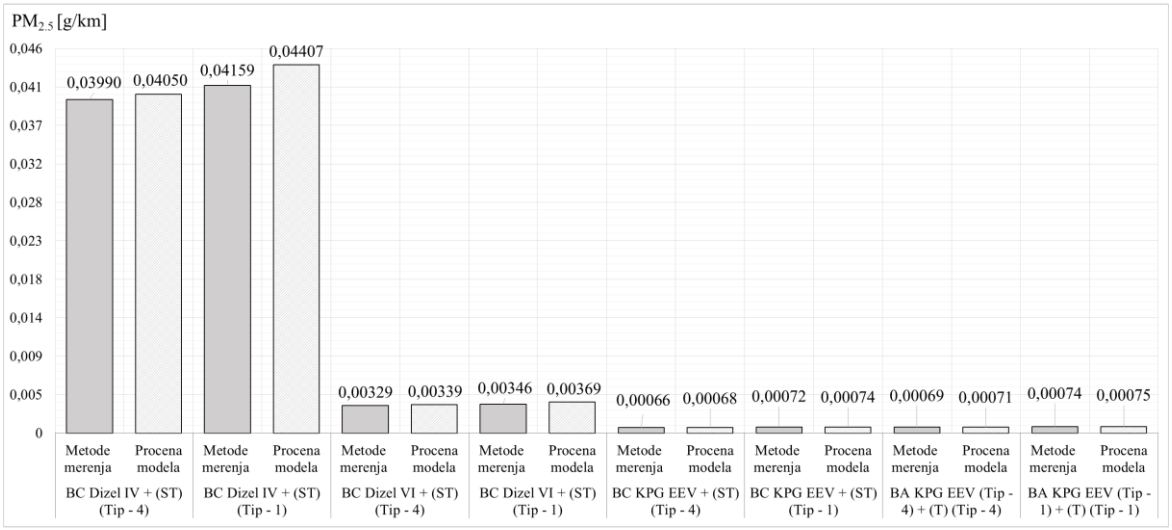
Na Slici 46. prikazano je poređenje prosečnih vrednosti emisije metana CH_4 za razmatrane skupove vozila. Emisija CH_4, gasa koji pored CO_2 utiče na stvaranje efekta staklene bašte, u zavisnosti je od vrste goriva, procesa sagorevanja i načina obrazovanja smeše, kao i primenjene tehnologije naknadnog tretmana gasova. Kod dizel motora emisija CH_4 je uglavnom niska, dok su kod oto motora sa pogonom na prirodni gas vrednosti emisije CH_4 više i javljaju se kao produkt nepotpunog sagorevanja. Emisija CH_4 predstavlja zavisnost od sastava smeše i sistema za naknadni tretman izduvnih gasova, prvenstveno trostepenog katalizatora, navedeno u Poglavlju 3. Takođe, važno je istaći da emisija CH_4 raste u oblastima blago siromašne smeše

(navedeno u Poglavlju 3.2). Rezultati modela prikazuju da najviše vrednosti imaju ekološki prihvatljiva vozila EEV sa pogonom na komprimovani prirodni gas, dok s druge strane vozila sa pogonom na dizel gorivo imaju približno iste vrednosti, bez obzira obzira na primenjene tehnologije i tipove nadgradnji.



Slika 46. Prosečne vrednosti emisije metana CH_4

U slučaju emisije čestičnih materija $PM_{2.5}$, prikazane na Slici 47., uticaj vrste pogonskog goriva i sistema za naknadni tretman gasova je najizraženiji. Naime, rezultati modela prikazuju da najviše vrednosti emisije $PM_{2.5}$ imaju vozila sa pogonom na dizel gorivo opremljena starijim tehnologijama. S druge strane, najniže vrednosti imaju ekološki prihvatljiva vozila EEV, što je posledica vrste goriva i primene sistema za naknadni tretman izduvnih gasova. Takođe, niske vrednosti imaju i vozila sa dizel pogonom opremljena novijim tehnologijama tretmana izduvnih gasova, poput selektivne katalitičke redukcije, filtera čađi i čestica, i dr. (opisano u Poglavlju 3.2).



Slika 47. Prosečne vrednosti emisije čestičnih materija $PM_{2,5}$

Uporedna analiza rezultata dizel vozila ukazuje na značaj primene ali i kasniju ispravnost sistema za naknadni tretman izduvnih gasova, sa posebnim osvrtom na dizel vozila i razlike u emisijama u odnosu na primenjene tehnologije. Na osnovu rezultata prikazanih na Slikama (41,

42, 43, 44, 45, 46 i 47) i regulatornih ograničenja razmatranih u Poglavlju 3, može se zaključiti da pri izboru vozila, pored pogonskog goriva, značajnu ulogu ima i sistem za naknadni tretman izduvnih gasova. Ova ograničenja obuhvataju postepeno zaoštravanje dozvoljenih graničnih vrednosti emisije izduvnih gasova. Takođe, pomenuta ograničenja se odnose i na uslove date u odnosu na oznaku vozila prema nameni, a koji se odnose na dozvoljena pogonska goriva, navedeno u Poglavlju 3.2. Ukoliko se u razmatranje uključi i starost voznog parka, koji je u Republici Srbiji u proseku 15 i više godina, kao i ciljevi razvoja energetskog sektora države, navedeni rezultati svakako pružaju značajan doprinos prilikom izbora pogonskog goriva ali i tipa nadgradnje za transport gasa. U kontekstu navedenog, unapređenja tehničkih karakteristika vozila i motora (način obrazovanja smeše, primena ali i naknadno održavanje ispravnosti sistema za naknadni tretman izduvnih gasova i dr.) od posebnog su značaja za vrednosti parametra izduvne emisije.

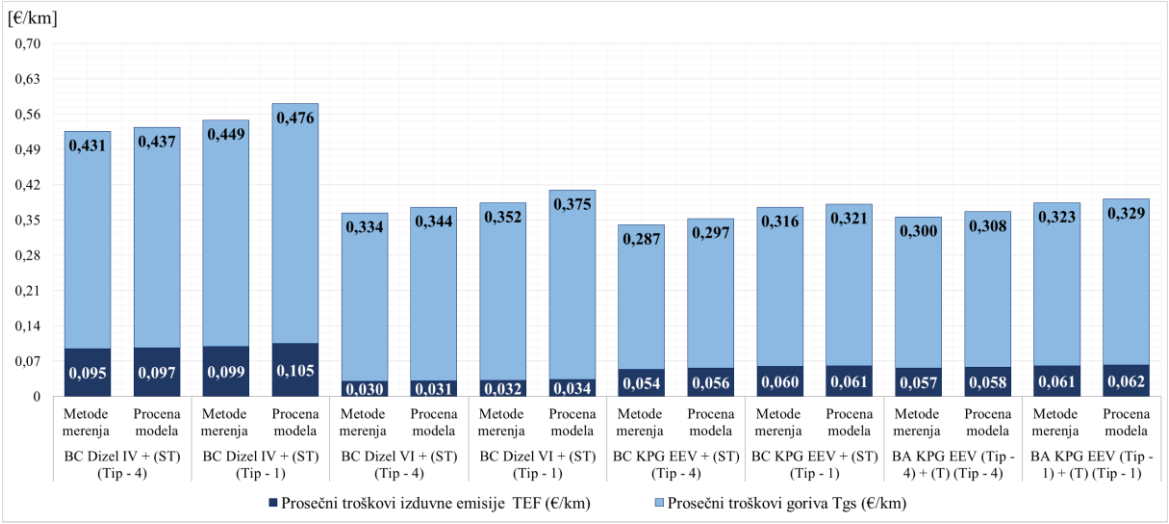
Rezultati dobijeni primenom modela, prikazani na Slikama (41, 42, 43, 44, 45, 46 i 47), analizirani su i upoređeni sa rezultatima prethodnih istraživanja dobijenih primenom prenosnih uređaja PEMS (Guo et al., 2014; Anderson, 2015; Quiros et al., 2016, 2017; Wang et al., 2022; Zheng et al., 2022). Autori u istraživanju (Guo et al., 2014) prikazali su rezultate merenja izduvne emisije CO_2, CO, NO_x i $PM_{2,5}$ kod autobusa sa pogonom na dizel i komprimovani prirodni gas. Istraživanje je obuhvatilo vozila opremljena tehnologijama koje odgovaraju emisionim normama Euro IV i V, pri čemu su analizirani uticaji vrste pogonskog goriva i primenjene tehnologije na izduvnu emisiju u gradskim uslovima vožnje. Rezultati prikazuju da najniže vrednosti emisije CO_2 i CO imaju vozila sa pogonom na dizel goriva opremljena tehnologijom koja odgovara Euro V, zatim slede vozila sa pogonom na dizel Euro IV i na kraju vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas, opremljena tehnologijom koja odgovara Euro V normi. S druge strane, u slučaju emisije NO_x i $PM_{2,5}$, najniže vrednosti emisije imaju vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas. S druge strane, Anderson, 2015. navodi rezultate merenja izduvne emisije CO_2, CO, CH_4, NO_x i $PM_{2,5}$, za različite vozne cikluse, kod teretnih vozila i autobusa sa pogonom na dizel i komprimovani prirodni gas. Istraživanje je obuhvatilo vozila sa Euro V i VI emisionim normama, pri čemu su analizirani uticaji vrste goriva, načina obrazovanja smeše i tehnologije naknadnog tretmana na vrednosti izduvne emisije. U pogledu načina obrazovanja smeše i primenjenih tehnologija, poređenje je izvršeno za vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas i dizel gorivo. Vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas opremljena su trostepenim katalizatorima i motorima koji rade u oblastima bliskim stehiometrijskoj smeši i sa blago siromašnom smešom. Nasuprot navedenim poređena su i vozila sa pogonom na dizel, dodatno opremljena sistemima za recirkulaciju izduvnih gasova, selektivnom katalitičkom redukcijom i filterima čestica. Rezultati prikazuju da su vrednosti emisije CO_2, $PM_{2,5}$ i NO_x više kod vozila sa pogonom na dizel, bez obzira obzira na primenjene tehnologije. Nasuprot navedenom, emisija CO i CH_4 značajno je viša kod vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas, bez obzira na način obrazovanja smeše i primenjenu tehnologiju. Važno je istaći da rezultati prikazuju da vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas, čiji motori rade sa blago siromašnom imaju niže vrednosti emisije CO_2, $PM_{2,5}$ i NO_x u odnosu na vozila čiji motori rade sa stehiometrijskom smešom.

Istraživanja (Quiros et al., 2016, 2017) porede rezultate izduvne emisije CO_2, CO, CH_4, NO_x i $PM_{2,5}$ kod teretnih vozila, utvrđene merenjem u uslovima gradske vožnje i vožnje na otvorenom putu. Poređenja su izvršena između vozila sa pogonom dizel, opremljena sistemima za selektivnu katalitičku redukciju i filterima čestica, i vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas opremljena trostepenim katalizatorima. Rezultati prikazuju da su za iste vozne uslove, vrednosti emisija CO_2, $PM_{2,5}$ i NO_x više kod dizel vozila u odnosu na vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas, dok su vrednosti CO i CH_4 značajno više kod vozila

sa pogonom na komprimovani prirodni gas. Sličan pristup, kao kod prethodnih istraživanja, primenili su (Zheng et al., 2022), gde je poređenje izduvne emisije CO i NO_x izvršeno kod sastava teretnih vozila u gradskim i međugradskim uslovima vožnje. Istraživanje je obuhvatilo vozila sa pogonom na dizel i komprimovani prirodni gas, opremljena tehnologijom koja odgovara emisionoj normi Euro V. Rezultati prikazuju da vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas imaju više vrednosti emisije CO i NO_x u odnosu na dizel vozila iste emisione norme, pri čemu su vrednosti značajno više u gradskim uslovima vožnje. Autori u radu (Wang et al., 2022) prikazali su rezultate merenja izduvne emisije CO i NO_x kod teretnih vozila sa pogonom na prirodni gas u zavisnosti od uslova vožnje i masenih parametara. Istraživanje je obuhvatilo vozila opremljena tehnologijama koje odgovaraju emisionim normama Euro V, pri čemu su analizirani uticaji vrste pogonskog goriva, mase vozila i režima vožnje na izduvnu emisiju. Rezultati prikazuju značajan uticaj masenih parametara na izduvnu emisiju. Naime, za gradske vozne uslove, lakša vozila imaju niže vrednosti emisije CO i NO_x u odnosu na teža vozila.

Analiza rezultata dobijenih razvijenim modelom pokazuje dobru saglasnost sa rezultatima prethodnih istraživanja (Guo et al., 2014; Anderson, 2015; Quiros et al., 2016, 2017; Zheng et al., 2022; Wang et al., 2022), pri čemu su uzeti u obzir uticaji vrste goriva, emisionih normi, masenih parametra i dr. Nešto više vrednosti emisije CO_2 i NO_x kod dizel vozila u istraživanjima (Guo et al., 2014; Anderson, 2015; Quiros et al., 2016) u odnosu na rezultate dobijene primenom razvijenog modela, mogu se objasniti činjenicom da su vozila obuhvaćena u navedenim istraživanjima, iako usklađena po kategorijama, masenim parametrima i emisionim normama, starija i sa većim brojem pređenih kilometara u odnosu na vozila obuhvaćena modelom (prikazano u Tabeli 32). Osnovne sličnosti razvijenog modela sa prethodnim istraživanjima i postojećim softverskim rešenjima ogledaju se u činjenici da su analizirani uticaji primene različitih vrsta pogonskih goriva kod teretnih vozila na izduvnu emisiju gasova, pri čemu su obuhvaćeni maseni parametri, emisione norme, različiti uslovi vožnje i dr. Posebno se naglašavaju i uticaji masenih parametara na povećenje izduvne emisije, pre svega zbog analize uticaja tipa nadgradnje na ukupnu efikasnost skupa vozila. Kako je prethodno nevedeno, razlika razvijenog modela u odnosu na postojeća rešenja je razmatranje uslova eksploatacije na masene parametre, odnosno na količinu transportovanog gasa po vožnji i potrebne zapreminske kapacitete, dok se njihov efekat kvantifikuje preko potrošnje goriva i izduvne emisije.

U nastavku rada, na Slici 48. prikazana je raspodela prosečnih vrednosti troškova izduvne emisije i troškova goriva, određenih primenom modela na osnovu podataka o potrošnji goriva dobijenih putnim merenjem i modelom. Rezultati modela ukazuju da vozila sa pogonom na dizel gorivo, opremljena tehnologijama koje odgovaraju emisionoj normi Euro VI, ostvaruju najniže troškove izduvne emisije. Takođe, izrazito niske troškove izduvne emisije imaju i ekološki prihvatljiva vozila EEV, dok s druge strane vozila sa pogonom na dizel opremljena starijim tehnologijama, imaju znatno više vrednosti ovih troškova. U slučaju troškova goriva, rezultati modela pokazuju da ekološki prihvatljiva vozila EEV ostvaruju niže troškove u odnosu na vozila sa dizel pogonom. Bitno je istaći da na rezultate modela značajno utiču aktuelne tržišne cene energenata, pri čemu su za potrebe modela korišćenje cene prirodnog gasa u iznosu od 0,92 €/kg, odnosno dizela goriva u iznosu od 1,40 €/kg. Takođe, važno je naglasiti i uticaj tipa nadgradnje na povećanje troškova izduvne emisije i troškova goriva. U proseku, skupovi vozila sa pogonom na dizel gorivo (odnosi se na sve tehnologije) opremljeni nadgradnjama sa posudama izrađenim od čelika (Tip–1) imaju u proseku oko 9% više troškove od skupova vozila sa pogonom na dizel opremljenih nadgradnjama sa posudama izrađenim od kompozitnih materijala (Tip–4).

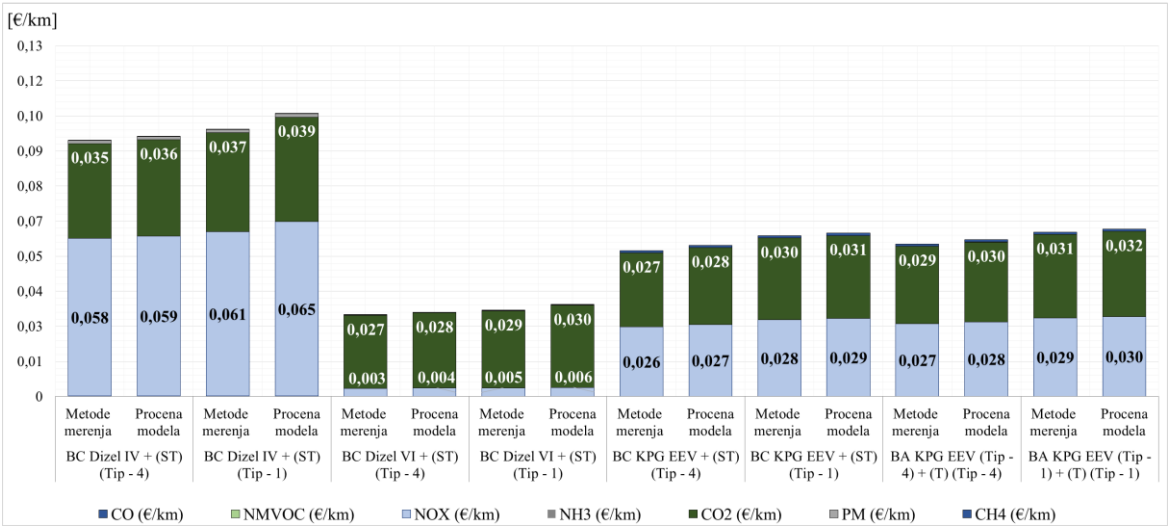


Slika 48. Raspodela troškova izduvne emisije i troškova goriva

Posmatrano sa stanovišta troškova vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas, skupovi vozila opremljeni nadgradnjama sa posudama izrađenim od čelika imaju u proseku oko 8% više troškove od skupova vozila sa posudama izrađenim od kompozitnih materijala. Navedenim razlikama doprinose maseni parametri koji značajno doprinose povećanju potrošnje goriva. Prikazane konačne procentualne vrednosti uvećanja troškova odnose se na objedinjene rezultate dobijene analizom oba izvora podataka (podaci dobijeni primenom modela i metodama merenja). U pogledu poređenja troškova sastava vozila za oba pogona, dizel i komprimovani prirodni gas, skupovi vozila sa dizel pogonom i starijim tehnologijama opremljeni nadgradnjama sa posudama izrađenim od čelika ($BC_{dizel\ IV}$ + ST (Tip–1)) imaju najviše troškove. Najviši troškovi mogu se objasniti uticajem masenih parametara, neoptimizovanim procesom sagorevanja koji dovode do veće potrošnje goriva, kao i ograničenom primenom savremenih sistema za naknadni tretman izduvnih gasova. Poredeći ukupne troškove skupa vozila sa dizel pogonom opremljenim novijim tehnologijama sa tipom nadgradnje od čelika ($BC_{dizel\ VI}$ + ST (Tip–1)) sa skupom vozila sa pogonom na komprimovani prirodni gas sa istim tipom nadgradnje (BC_{KPGEEV} + ST (Tip–1)), troškovi izduvne emisije i goriva, viši su kod skupa sa dizel pogonom u proseku za 5%.

Kako je i prethodno pomenuto, troškovi izduvne emisije su niski u poređenju sa troškovima goriva, u datom kontekstu na Slici 49., prikazana je raspodela prosečnih vrednosti troškova izduvne emisije za razmatrane skupove vozila. Dominantan udeo u troškovima emisije izduvnih gasova, za obe vrste goriva, imaju ugljen-dioksid CO_2 i azotni oksidi NO_x, dok su ostali zagađivači zastupljeni u manjoj meri. Važno je istaći da izrazito male troškove emisije, pre svega troškove azotnih oksida, imaju skupovi vozila sa dizel pogonom opremljenih novijim tehnologijma. Niski troškovi se mogu objasniti prmenom savremenih sistema za naknadni tretman izduvnih gasova. U prethodnom delu rada navedeno je da koncentracija azotnih oksida može varirati i da je prvenstveno u zavisnosti od temperature sagorevanja i primene naknadnih tehnologija tretmana izduvnih gasova, što svakako odgovara rezultatima modela za skupove vozila sa dizel pogonom i starijim tehnologijama. S druge strane, u odnosu na vozila sa dizel pogonom i novijim tehnologijama vrednosti troškova azotnih oksida ekološki prihvatljivih vozila EEV sa pogonom na komprimovani prirodni gas su relativno visoke. Imajući u vidu da EEV vozila, tj. njihovi motori rade u oblastima bliskim stehiometrijskoj smeši ($\lambda \approx 1$), visoke vrednosti troškova mogu se objasniti sastavom smeše, višom temperaturom sagorevanja, većom potrošnjom i dr. Bitno je i naglasiti da su referentne vrednosti emisionih faktora

zagađivača ekološki prihvatljivih vozila EEV više od vozila sa dizel pogonom opremljenih tehnologijom koja odgovara emisionoj normi Euro VI.



Slika 49. Raspodela troškova izduvne emisije

Sa stanovišta procene eksternih troškova, rezultati dobijeni primenom modela prikazuju visoku saglasnost sa vrednostima eksternih troškova iz prethodnih istraživanja (Maibach, Schreyer, Sutter, Van Essen, Boon, Smokers, Schroten, Doll, Pawlowska, and Bak, 2008; De Palma, Lindsey, Quinet, and Vickerman, 2011; Korzhenevych, Dehnen, Bröcker, Holtkamp, Meier, Gibson, Varma, and Cox, 2014; Van Essen et. al., 2019). Uočena saglasnost ukazuje da razvijeni model na zadovoljavajući način kvantifikuje negativne uticaje izduvne emisije, koja potiče od drumskog teretnog saobraćaja, sa troškovima povezanim sa zagađenjem vazduha i klimatskim promenama.

U skladu sa navedenim, u Tabeli 39. prikazano je poređenje modelom određenih prosečnih vrednosti eksternih troškova sa prosečnim vrednostima iz prethodnih istraživanja. Prikazane vrednosti predstavljaju kvantifikaciju uticaja izduvne emisije koja potiče od teških teretnih vozila na zagađenje vazduha i klimatske promene. Manja odstupanja sa vrednostima eksternih troškova iz prethodnih istraživanja mogu se objasniti razlikama u ulaznim parametrima, koji se prvenstveno odnose na procenjene trenutne vrednosti jediničnih troškova zagađivača ali i kroz primenu poreskih modela. Naime, države članice Unije primenom poreskih modela zasnovanih na dodatnom oporezivanju emisije izduvnih gasova, kontrolišu dinamiku prelaska sa konvencionalnih energenata na ekološki prihvatljive energente u privrednim sektorima, uključujući i saobraćajni.

Tabela 38. Prosečne vrednosti eksternih troškova za drumski teretni saobraćaj

Kategorija vozila	Pogonsko gorivo /Emisiona norma	Prosečno opterećenje vozila	Vrednosti troškova utvrđene modelom		Vrednosti troškova utvrđene na osnovu prethodnih istraživanja		Ukupna razlika
		[t]	[€/km]	[€/tkm]	[€/km]	[€/tkm]	[%]
Teška teretna vozila 34–40t	Dizel/Euro IV	24,47	0,099	0,0041	0,100	0,0041	8
	Dizel/Euro VI	24,47	0,032	0,0013	0,037	0,0015	
	KPG/EEV	24,47	0,032	0,0024	0,061	0,0025	

Izvor:
[1] Maibach et. al., 2008. Handbook on estimation of external cost in the transport sector;
[2] De Palma et. al., 2011. A handbook of transport economics;
[3] Korzhenevych et. al., 2014. Update of the handbook on external costs of transport;
[4] Van Essen et. al., 2019. Handbook on the external costs of transport.

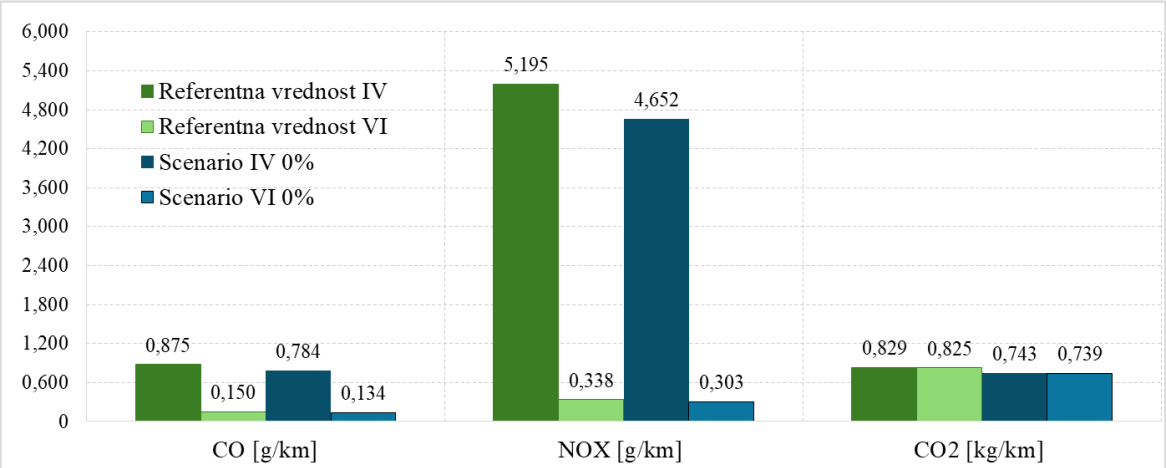
5.2 Analiza osetljivosti modela

Analiza osetljivosti sprovedena je metodom promene jednog parametra, pri čemu je ispitivan uticaj promena pojedinačnih ulaznih parametara na potrošnju goriva i emisiju izduvnih gasova. Struktura modela postavljena je tako da se potrošnja goriva procenjuje za svaku deonicu trase u odlasku i povratku, pri čemu se za svaki smer koriste različite vrednosti masa vozila, nagiba deonice, eksploatacione brzine i faktora međusobnog uticaja vozila u saobraćajnom toku. Model posebno obrađuje podatke potrošnje goriva, koji se naknadno proširuju sa prosečnim referentnim vrednostima izduvne emisije, koje odgovaraju razmatranim vozilima prema godini proizvodnje, vrsti goriva, masenim parametrima, emisionoj normi i dr. Imajući u vidu navedeno, analiza osetljivosti modela sprovedena je za dva scenarija u opsegu –5%, –2.5%, 0%, 2.5% i +5%. Prvi scenario obuhvata promenu izduvne emisije skupa vozila u odnosu na promenu potrošnje goriva i masene parametre, primenom referentnih vrednosti emisije koje odgovaraju vozilima sa starijim tehnologijama tretmana izduvnih gasova. Drugi scenario obuhvata iste ulazne parametre, uz primenu referentnih vrednosti emisije koje odgovaraju vozilima sa novijim tehnologijama tretmana izduvnih gasova, prikazano u Tabeli 40. Vrednosti navedene u Tabeli 40. odgovaraju prosečnim vrednostima emisionih faktora zagađivača utvrđenim na trasi za oba scenarija i razmatrane opsege.

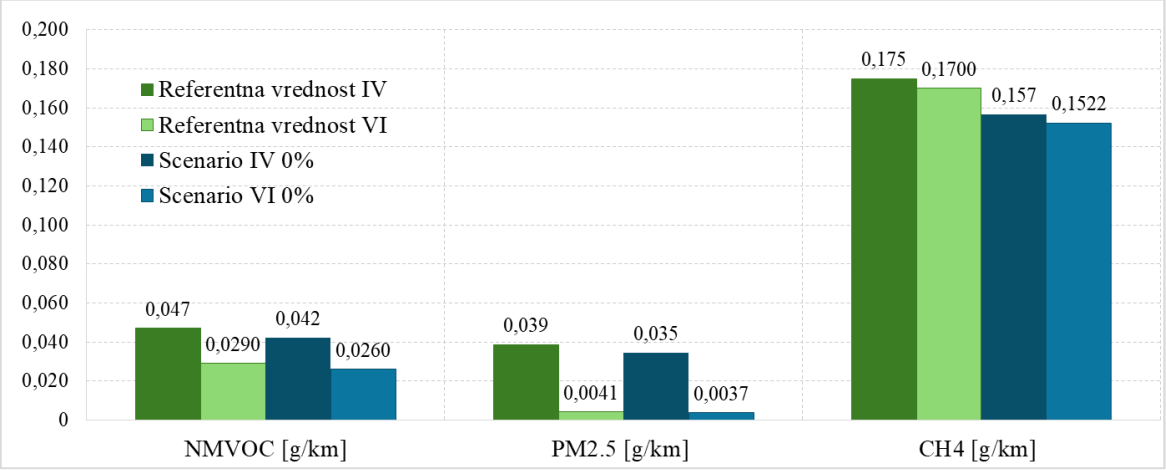
Tabela 39. Analizirani parametri metode

Parametri		Promena				
		–5%	–2,5%	0%	2,5%	5%
Masa skupa vozila m_{sv} [kg]		35794	36736	37678	38620	39562
Prosečna potrošnja goriva po smeru [kg/km]		0,2715	0,2725	0,2735	0,2746	0,2756
Referentne vrednosti prosečne izduvne emisije		Prvi Scenario IV				
CO IV [g/km]	0,875	0,7776	0,7806	0,7836	0,7866	0,7896
NMVOC IV [g/km]	0,047	0,0418	0,0419	0,0421	0,0423	0,0424
NOX IV [g/km]	5,195	4,6168	4,6347	4,6524	4,6701	4,6879
CO_2 IV [kg/km]	0,829	0,7369	0,7397	0,7425	0,7454	0,7482
$PM_{2,5}$ IV [g/km]	0,039	0,0343	0,0344	0,0346	0,0347	0,0348
CH_4 IV [g/km]	0,175	0,1555	0,1561	0,1567	0,1573	0,1579
Referentne vrednosti prosečne izduvne emisije		Drugi Scenario VI				
CO VI [g/km]	0,150	0,1333	0,1338	0,1343	0,1348	0,1354
NMVOC VI [g/km]	0,029	0,0258	0,0259	0,0260	0,0261	0,0262
NOX VI [g/km]	0,338	0,3004	0,3015	0,3027	0,3039	0,3050
CO_2 VI [kg/km]	0,825	0,7331	0,7359	0,7388	0,7416	0,7444
$PM_{2,5}$ VI [g/km]	0,004	0,0036	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037
CH_4 VI [g/km]	0,170	0,1511	0,1517	0,1522	0,1528	0,1534

Promene ulaznih parametara i izduvne emisije (emisionih faktora zagađivača) prikazane su tabelarno i dijagramski, radi lakšeg uočavanja trenda promene po scenarijima. Na Slikama 50 i 51, prikazana je razlika u promeni emisionih faktora zagađivača (CO, NO_x, CO_2, NMVOC, $PM_{2,5}$ i CH_4) po scenarijima za početni opseg 0% i različite referentne vrednosti. Dobijeni rezultati ukazuju da se izduvna emisija menja u skladu sa promenom potrošnje goriva i početnim referentnim vrednostima, koje su u zavisnosti od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila (godine proizvodnje, vrste goriva, masenih parametra, emisione norme i dr.).



Slika 50. Analiza osetljivosti modela procene izduvne emisije CO, NO_x i CO_2



Slika 51. Analiza osetljivosti modela procene izduvne emisije NMVOC, PM i CH_4

5.3 Zaključna razmatranja

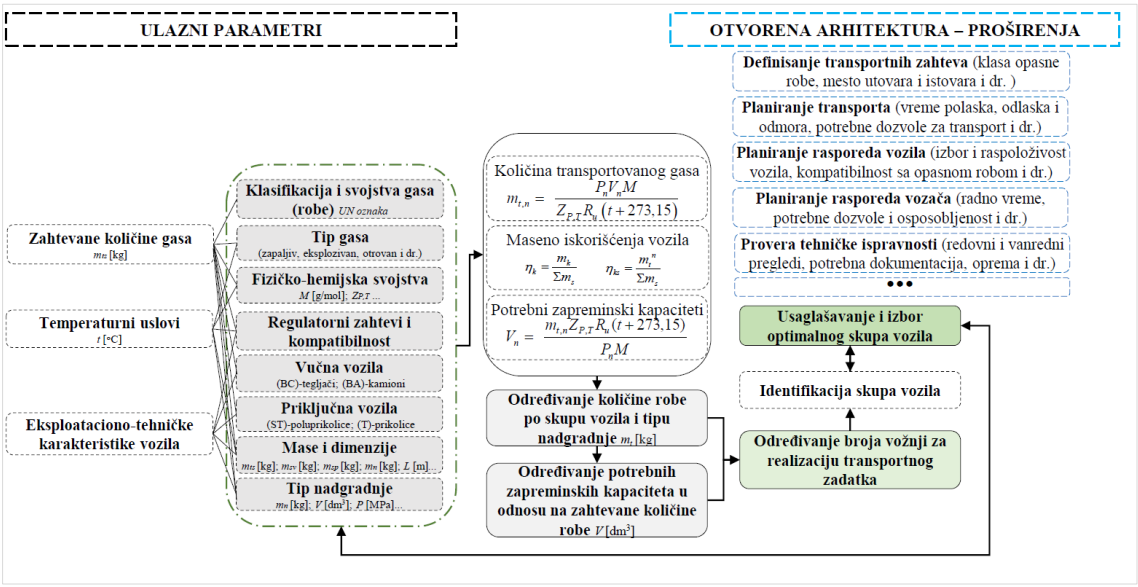
Razvijeni model integriše eksploataciono–tehničke karakteristike vozila i nadgradnji namenjenih za transport komprimovanih gasova sa uslovima eksploatacije i fizičko–hemijskim svojstvima gasa koji se transportuje u cilju procene izduvne emisije i njenih troškova. Na osnovu sprovedene analize i ostvarenih rezultata, može se zaključiti da model zasnovan na podacima o potrošnji goriva, dobijenim merenjem i proračunom, kao i podacima o emisionim faktorima zagađivača i njihovim troškovima, utvrđenim na osnovu prethodnih istraživanja, omogućava pouzdanu procenu izduvne emisije i njenih troškova. Rezultati modela pokazuju dobro slaganje sa rezultatima iz prethodnih istraživanja, čime se potvrđuje validnost modela i njegova primenljivost u postupcima procene parametara izduvne emisije i troškova emisije izduvnih gasova, kod vozila sa različitim vrstama goriva i tipovima nadgradnji. Modelom je moguće predvideti i kvantifikovati negativne uticaje koji potiču od vrste pogonskog goriva ali i tipa nadgradnje, čime se doprinosti donošenju odluka o izboru optimalnog vozila i nadgradnje u cilju efikasnijeg i ekološki prihvatljivog transporta gasa. Takođe, navedene mogućnosti mogu doprineti planiranju i organizaciji postojećih voznih kapaciteta, kroz bolja iskorišćenja voznih kapaciteta i ublažavanje negativnih uticaja na životnu sredinu, prvenstveno izborom voznih sastava u odnosu na vrstu pogonskog goriva i tipa, odnosno materijala izrade nadgradnje.

Pored navedenog, rezultati modela mogu da posluže kao doprinos oporezivanju emisije izduvnih gasova teretnih vozila, prvenstveno kao mehanizam za regulaciju brzine tranzicije sa dosadašnjih konvencionalnih pogonskih energenata na ekološki prihvatljive energente. Ključni efekti primene dobijenih rezultata ogledaju se u unapređenju procesa transporta prirodnog gasa, stvaranjem uslova za transport većih količina gasa uz ublažavanje negativnog uticaja na životnu sredinu. Ograničenja modela ogledaju se u dostupnosti i kvalitetu ulaznih podataka, od kojih zavisi tačnost izlaznih rezultata procene. Bitno je naglasiti da je model razvijen na osnovu početnih ciljeva i motiva ovog istraživanja, a koji se odnose na unapređenje procesa transporta prirodnog gasa u Republici Srbiji sa naglaskom na fleksibilnost transporta i funkcionalnu primenljivost tehnologija, pre svega po pitanju pogonskih goriva i tehnologije transporta gasa. Svakako, model uz određena prilagođavanja omogućava primenu na ostale kategorije vozila ali i ostale vrste zagađujućih materija koje potiču od sagorevanja ugljovodoničnih goriva. Takođe, uz odgovarajuća metodološka prilagođavanja, model je moguće primeniti i na ostale klase opasne robe.

6. Model procene transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta

6.1 Opis modela

U ovom poglavlju opisan je model za procenu transportovanih količina gasa po vozilu–nadgradnji i potrebnih zapreminskih kapaciteta u zavisnosti od raspoloživih voznih kapaciteta i zahtevanih količina gasa. Za realizaciju određenog transportnog zadatka, tj. transporta određene količine gasa, zahteva se pažljiva analiza različitih faktora, pre svega kako bi se osigurala bezbednost transporta i usklađenost sa propisima, ali ujedno i obezbedila odgovarajuća efikasnost. Model prikazan na Slici 52., zasniva se na integrisanom pristupu procene količine gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta, pritom uzimajući u obzir uticaje koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, transportnih i klimatskih uslova eksploatacije. Kao takav, razvijeni model ima ciljano otvorenu arhitekturu sa mogućnošću proširenja u zavisnosti od namene voznog parka, početnih zahteva ili konačnog cilja istraživanja. Proširenja se mogu odnositi na parametre koji opisuju uticaje putnih i saobraćajnih uslova eksploatacije ali i na organizaciju rada voznog parka, uključivanjem parametara operativnog plana rada (raspoloživost vozila, redovne i vanredne preglede–održavanja, raspoloživost vozača, potrošnja goriva i maziva i dr.). Takođe, kako je navedeno i u prethodnim poglavljima, razvijeni model odlikuje fleksibilnost i mogućnost prilagođavanja na ostale vrste gasova i klase opasne robe.



Slika 52. Model procene količine gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta

Ključni koraci pri izboru optimalnog skupa vozila za transport određene količine gasa, uključuju: zahtevane količine gasa, klasifikaciju gasa (tip gasa: zapaljiv, otrovan, inertan), fizičko–hemijska svojstva gasa (molarna masa, faktor kompresibilnosti, uslovi transporta: transport na visokim pritiscima u komprimovanom stanju ili u kriogenim uslovima u utečnjenom stanju, stabilnost pri određenim pritiscima i temperaturama, zapaljivost i reaktivnost i dr.). Sledeći u nizu su regulatorni zahtevi i uslovi kompatibilnosti vozila i nadgradnji sa radnom materijom koja se transportuje (koji uključuju podatke o odobrenju tipa vozila i nadgradnji–posuda, kompatibilnost posuda sa radnom materijom (gasom), tj. da li se

zahtevana materija sme transportovani sa raspoloživim vozilima–nadgradnjama i dr.). U okviru ovog pristupa, modelom je omogućena identifikacija optimalnog skupa u odnosu na raspoložive vozne kapacitete. Model selektuje raspoloživa vozila i nadgradnje u odnosu na oznaku vozila prema nameni i slovnobrojčanu oznaku (kod) nadgradnje, uslove kompatibilnosti i važnosti sertifikata o odobrenju za vozila za transport određene opasne robe. Na taj način, isključena je mogućnost da se prilikom planiranja radnih aktivnosti razmatraju vozila i nadgradnje koja nisu kompatibilna sa opasnom materijom ili su u procesu redovnih ili vanrednih pregleda. Pored navedenog, postupak obuhvata i tehničke parametre vozila (dozvoljena masena opterećenja, nosivost, dimenzije tovarnog prostora–kapacitet tovarnog prostor i dr.), kao i tehničke parametre nadgradnji (mase, materijale izrade, radne pritiske, zapreminske kapacitete i dr.).

Nakon selekcije i izbora ulaznih parametara, u sledećoj fazi modela, pristupa se utvrđivanju zavisnosti radnih uslova (pritiska i temperature) primenom faktora kompresibilnosti, i njihovih uticaja na količine transportovanog gasa po vožnji, masena iskorišćenja i potrebne zapreminske kapacitete. U zavisnosti od početnih zahteva i raspoloživih voznih kapaciteta, model omogućava procenu količine gasa po vozilu–nadgradnji, masena iskorišćenja vozila, potrebne zapreminske kapacitete, kao i broj vožnji koji je neophodan za realizaciju zahteva, odnosno transporta zahtevanih količina gasa. U navedenom kontekstu, kako bi se sveobuhvatno sagledao uticaj svih parametara, u nastavku rada razmatra se značaj drumskog transporta gasa, tipovi ležišta, hemijski sastav i fizička svojstva prirodnog gasa na transportovane količine gasa, kao i postupci za određivanje količine gasa po vozilu–nadgradnji i potrebnih zapreminskih kapaciteta.

6.2 Uvod u značaj drumskog transporta prirodnog gasa

Prirodni gas predstavlja jedan od najvažnijih energetskih resursa savremenog sveta, zahvaljujući širokoj primeni, ekonomičnosti i relativno niskom ekološkom uticaju u poređenju sa drugim fosilnim gorivima (IEA, 2023). Efikasno snabdevanje tržišta prirodnim gasom zahteva dobro razvijen i pouzdan distributivni sistem od izvora snabdevanja do krajnjih potrošača. Kao takav, distributivni sistem obuhvata širok spektar delatnosti, od procesa prečišćavanja gasa do sistema gasovoda u čijem su sastavu kompresorske stanice, skladišta, merno–regulacione i primopredajne stanice, kao i naknadne načine distribucije gasa do krajnjih korisnika, u kojem drumski transport ima svoje mesto i ulogu (Speight, 2018; Deng et al., 2018; Reddi et al., 2018a; Mićić, 2020; Buschmann et al., 2024; Martínez, 2025). Kako je pomenuto u uvodnim poglavljima ovog rada, kod država sa nedovoljno razvijenom infrastrukturom, drumski transport prirodnog gasa pruža funkcionalnu primenljivost i značajnu fleksibilnost u isporuci, pritom omogućavajući pouzdano i u zadatim okvirima efikasno snabdevanje krajnjih potrošača. Naime, navedena fleksibilnost od posebnog je značaja u područjima gde trenutni tehnološki kapaciteti ili zakonski okviri onemogućuju razvoj mreže gasovoda, a gde je potrebna brza i precizna distribucija gasa, kao što su udaljene industrijske zone, stanice za snabdevanje gorivom i dr.

U kontekstu navedenog, kontinuirani razvoj u oblasti pokretne opreme pod pritiskom, posebno teretnih vozila i njihovih nadgradnji, praćen kroz primenu savremenih materijala i sigurnosnih sistema, učinio je drumski transport prirodnog gasa pouzdanijim i značajno efikasnijim. U skladu s tim, vozila i nadgradnje namenjene za skladištenje i transport prirodnog gasa nalaze široku primenu u raznim privrednim sektorima, poput energetike, industrije, saobraćaja i dr. (Matthews, 2001; Bogner i Isailović, 2016; Vašalić i ostali, 2024).

Razumevanje značaja drumskog transporta prirodnog gasa ključno je za identifikaciju mogućih unapređenja efikasnosti transporta, smanjenja troškova i negativnih uticaja na životnu sredinu, ali i za dalji razvoj kao doprinos ka ostvarivanju održivog sistema distribucije. Kao takav, drumski transport ne samo da zadovoljava lokalne potrebe, već može imati i značajan doprinos u povezivanju domaćeg energetskog sektora sa reginalnim tržištem. U saglasnosti sa navedenim, drumski transport prirodnog gasa, pripada sektoru drumskog transporta opasne robe i na teritoriji Republike Srbije se obavlja u skladu sa odredbama sledećih nacionalnih zakonskih i podzakonskih akata, kao i međunarodnih ugovora, datih u Tabeli 41.

Tabela 40. Regulatorni okvir za drumski transport prirodnog gasa

Naziv propisa	Opis
Zakon o transportu opasne robe ("Sl. glasnik RS", br. 104/16, 83/18, 95/18 - dr. zakon i 10/19 - dr. zakon);	Ovim zakonom utvrđeni su uslovi za obavljanje unutrašnjeg i međunarodnog transporta opasne robe u drumskom, železničkom i unutrašnjem vodnom saobraćaju na teritoriji Republike Srbije. Takođe, definisani su zahtevi u odnosu na ambalažu, pokretnu opremu pod pritiskom i cisterne namenjene za transport opasne robe, kao i nadležnosti državnih organa, organizacija i učesnika u transportu opasne robe.
Zakon o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti ("Sl. glasnik RS", br. 49/21);	Usvojen je na osnovu ovog Zakona iz ("Sl. glasnik RS", br. 36/09), takođe, usvojeni su i prateći podzakonski akti (uredbe, pravilnici) za oblast pokretne posude pod pritiskom u kojima su implementirane Evropske direktive i izvršena harmonizacija standarda.
Uredba o pokretnoj opremi pod pritiskom ("Sl. glasnik RS", br. 120/17);	Doneta je na osnovu člana 14. Zakona o transportu opasne robe ("Sl. glasnik RS", br. 104/16); Uredbom su utvrđeni tehnički zahtevi i postupci ocenjivanja usaglašenosti za pokretnu opremu pod pritiskom koja se koristi u transportu opasne robe. Takođe, definisani su postupci i radnje od strane proizvođača, distributera, vlasnika i operatera sa pokretnom opremom pod pritiskom. Uredba je usklađena sa međunarodnim standardima i propisima, pre svega sa Direktivom (2010/35/EU). Pokretna oprema pod pritiskom koja se stavlja na tržište Republike Srbije mora biti usaglašena sa zahtevima Sporazuma (ECE/326 i 352) i odredbama ove Uredbe. Sertifikati i izveštaji o usaglašenosti pokretne opreme pod pritiskom, koje je izdalo imenovano telo bilo koje države članice Evropske unije važe u Republici Srbiji. Oprema koja ne nosi raniji znak usaglašenosti, može biti predmet ponovnog ocenjivanja usaglašenosti, nakon čega se stavlja nacionalni znak usaglašenosti. Znak usaglašenosti Republike Srbije predstavlja tri velika slova A povezana u obliku jednakostraničnog trougla, dok π oznaka predstavlja usaglašenost opreme sa Direktivom (2010/35/EU).
Uredba o imenovanju tela za ocenjivanje usaglašenosti ("Sl. glasnik RS", br. 18/22);	Doneta je na osnovu člana 15. Zakona o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti;
Uredba o načinu sprovođenja ocenjivanja usaglašenosti i ispravi o usaglašenosti ("Sl. glasnik RS", br. 127/21);	Doneta je na osnovu člana 15. Zakona o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti;
Uredba o znaku usaglašenosti ("Sl. glasnik RS", br. 4/22);	Doneta je na osnovu člana 14. Zakona o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti; Znak usaglašenosti je oznaka koju isključivo proizvođač postavlja na pokretnu opremu pod pritiskom, izuzev ponovnog ocenjivanja usaglašenosti gde Imenovana tela sprovode ocenjivanje usaglašenosti, kojom se potvrđuje da je oprema usaglašena sa tehničkim zahtevima utvrđenim u Sporazumu i odredbama ovih uredbi.
Međunarodni sporazum o drumskom transportu opasne robe, izdanje 2023 i 2025 (ECE/326 i 352);	Sporazum o međunarodnom drumskom prevozu opasne robe (ECE/326 i 352) od 30. septembra 1957. godine ("Službeni list SFRJ - Međunarodni ugovori", br. 59/72 i 8/77, "Službeni glasnik RS - Međunarodni ugovori", br. 2/10, 14/13, 2/14 - ispr., 22/15, 6/17, 15/19, 19/21 i 4/23), sa naknadnim izmenama i dopunama; Sporazum propisuje odredbe za bezbedan drumski transport opasne robe između država potpisnica, uključujući i Republiku Srbiju. Sastoji se od dva aneksa: Aneks A, sadrži opšte odredbe i zahteve za opasne materije i predmete (robu). Obuhvata klasifikaciju, pakovanje, označavanje, dokumentaciju i određene aspekte pakovanja i transporta. Većina odgovornosti pripada pošiljaocu, dok su neke obaveze zajedničke pošiljaocu i prevozniku. Aneks B, odnosi se na transportnu opremu i operacije. Propisuje zahteve za posadu vozila, opremu, operacije, dokumentaciju, konstrukciju i odobrenje vozila. Obuhvata tehničke zahteve za vozila, ambalažu i opremu, uključujući pokretnu opremu pod pritiskom. Takođe, obuhvata i aspekte koje se odnose na transportne operacije, a koje su uglavnom u nadležnosti prevoznika.

Izvor:
[1] Zakon o transportu opasne robe ("Sl. glasnik RS", br. 104/16, 83/18, 95/18 - dr. zakon i 10/19 - dr. zakon), https://www.mgsi.gov.rs/;
[2] Zakon o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti ("Sl. glasnik RS", br. 49/21), https://www.mgsi.gov.rs/;
[3] Uredba o pokretnoj opremi pod pritiskom ("Sl. glasnik RS", br. 120/17), https://www.mgsi.gov.rs/;
[4] Uredba o imenovanju tela za ocenjivanje usaglašenosti ("Sl. glasnik RS", br. 18/22), https://www.mgsi.gov.rs/;
[5] Međunarodni sporazum o drumskom transportu opasne robe, izdanje 2023 i 2025 (ECE/326 i 352), https://www.mgsi.gov.rs/.

Distributeri, vlasnici i operateri dužni su da osiguraju da pokretna oprema pod pritiskom, koja se koristi za transport prirodnog gasa, ispunjava sve relevantne tehničke i bezbednosne standarde i da je u potpunosti je usaglašena sa propisima navedenim u zakonskim i podzakonskim aktima, Sporazumu (ECE/326 i 352) i Direktivi (2010/35/EU). Ukoliko se utvrdi da oprema predstavlja rizik, tj. da njena upotreba može izazvati posledice po bezbednost, zdravlje ljudi i životnu sredinu, svi učesnici u lancu (distributeri, vlasnici i operateri) dužni su da o tome obaveste proizvođača i nadležne institucije, uključujući nadležno Ministarstvo, kako bi se oprema povukla. Vlasnik opreme ili operater sme koristiti samo opremu sa važećim sertifikatima, izveštajima o periodičnom ili međukontrolisanju i trajno utisnutim žigovima, kojim se potvrđuje usklađenost sa propisima. Takođe, svi učesnici dužni su da sarađuju sa Imenovanim telima za ocenjivanje usaglašenosti, koja su ovlašćena za sprovođenje postupaka kontrolisanja i ispitivanja pokretne opreme pod pritiskom, navedeno u gore pomenutim zakonskim i podzakonskim aktima (Zakon, 10/19; Zakon, 49/21; Uredba, 120/17; Uredba, 18/22; ECE/326 i 352). Primenom navedenog, osigurana je odgovornost svih učesnika u procesu transporta, kao i bezbednost transporta tokom projektovanog veka upotrebe pokretne opreme pod pritiskom.

Pokretna oprema pod pritiskom obuhvata posude pod pritiskom, cisterne, baterijska vozila, MEGC kontejnere, kao i njihovu opremu (sisteme spojnih cevi, sigurnosnih uređaja, mernih instrumenta, uređaja za punjenje i pražnjenje i dr.), u saglasnosti sa Sporazumom (ECE/326 i 352), navedeno u Poglavlju 3. U narednom odeljku rada, u cilju boljeg razumevanja problematike transporta gasova, pre svega prirodnog gasa, opisane su zavisnosti fizičko–hemijskih karakteristika prirodnog gasa od tipa ležišta.

6.2.1 Tipovi ležišta, hemijski sastav i fizička svojstva prirodnog gasa

Prirodni gas, poznat i kao zemni gas, sastoji se uglavnom od metana (CH_4), ali sadrži i manje količine drugih ugljovodonika, poput etana (C_2H_6), propana (C_3H_8) i butana (C_4H_{10}). Takođe u sastavu prirodnog gasa prisutne su i nečistoće, poput azota (N_2), helijuma (He), ugljen–dioksida (CO_2), vodonika (H_2) i sumporvodonika (H_2S). Svrstava se u lako zapaljive gasove, a njegove vrednosti određuju se prema gorivnim svojstvima metana koji je bezbojan i bez mirisa, a prilikom sagorevanja daje svetao i blago sjajan plamen. Gasne instalacije označavaju se žutom bojom (Mokhatab, Poe and Speight, 2006; Bogner i Isailović, 2008; Speight, 2018). U dosadašnjim istraživanjima postoji mnogo različitih teorija o nastanku fosilnih goriva, a posebno kada je reč o prirodnom gasu. U tom kontekstu, stavovi u stručnoj literaturi temelje se na dva glavna procesa nastanka, biogenom i abiogenom procesu (Mokhatab et al., 2006; Faramawy, Zaki and Sakr, 2016). Biogeni proces podrazumeva da prirodni gas nastaje sporom razgradnjom organskih materija u sedimentnim basenima, na velikim dubinama, pod uticajem visokih temperatura i pritiska. Kao rezultat ovog procesa razgradnje, formiraju se ugalj, nafta i prirodni gas. Ovaj proces je povezan je sa nalazištima nafte i uglja, gde je prisutan prirodni gas u vidu gasnih kalota. Takođe, biogeni proces podrazumeva i formiranje kalota metana delovanjem mikroorganizama u anaerobnim uslovima, tj. u odsustvu kiseonika. U ovom procesu, mikroorganizmi hemijski razgrađuju organsku materiju i pri tome proizvode metan, a ova vrsta gasa poznata je kao biogeni prirodni gas. Primenom savremenih tehnologija omogućena je proizvodnja biogenog gasa iz biomase (Weiland, 2010; John and Singh, 2011; Singh, Pandey and Gnansounou, 2016; Pušin i Katić, 2019). Nasuprot navedenom, abiogeni proces podrazumeva mogućnost da prirodni gas ima neorgansko poreklo. Prema ovoj teoriji, gas nastaje duboko u Zemljinom plaštu kroz hemijske reakcije između ugljenika i vodonika. Ovi procesi nisu povezani s organskom materijom, već su rezultat

geotermalnih procesa unutar Zemlje. Iako je abiogena teorija manje prihvaćena u naučnoj zajednici, koristi se za objašnjenje određenih nalazišta prirodnog gasa, naročito onih koja nisu povezana s organskim sedimentima. Takvi procesi često se dešavaju tokom hlađenja magme, obično u hidrotermalnim sistemima, gde dolazi do interakcije vode i stena (Speight, 2013, 2018).

Posmatrano sa aspekta trenutnih tehnoloških mogućnosti za proizvodnju i eksploataciju gasa, posebno u pogledu tipa ležišta i dostupnosti tehnologija, načini dobijanja prirodnog gasa dele se na one iz konvencionalnih i nekonvencionalnih ležišta. Gas dobijen iz konvencionalnih ležišta naziva se prirodni gas ili prirodni naftni gas i eksploatiše se iz gasnih, gasno–naftnih i gasno–kondenzatnih ležišta (Mokhatab et al., 2006; Speight, 2018; Mićić, 2020). Nakon ekstrakcije na površinu, primenom posebnih tehnoloških procesa, gas se odvaja od primesa (poput nafte, vode, pratećih ugljovodonika i nečistoća) i dovodi u granice propisanog kvaliteta, nakon čega se transportuje gasovodima velikog prečnika do skladišta, dok se distribucija do krajnjih korisnika obavlja sa nekim od vidova transporta. Gas dobijen iz gasnih ležišta naziva se suvi ili siromašni prirodni gas. Gasna ležišta su izolovana, nisu u direktnoj vezi sa naftom i sadrže isključivo gas. U ovim ležištima metan je dominantan ugljovodonik, dok se etan, propan i butan nalaze uglavnom u malim količinama. Pritisak u takvim ležištima može dostići i do 10 MPa (Mokhatab et al., 2006; Speight, 2018; Mićić, 2020). Gas dobijen iz gasno–naftnih ležišta naziva se vlažni ili bogati gas. U ovim ležištima, pored metana, prirodni gas sadrži znatno veće količine etana, propana, butana i težih ugljovodonika, pa je jedan od razloga zašto se ovaj gas naziva i bogati gas naftnog porekla. U gasno–naftnim ležištima moguća su dva slučaja: da gas prati naftu ili da nafta prati gas. U oba slučaja, deo gasa je rastvoren u nafti, dok se slobodni deo nalazi iznad nje, u takozvanoj gasnoj kapi. Taj slobodni gas svrstava se u grupu prirodnih naftnih gasova, dok se gas rastvoren u nafti naziva pratećim ili kaptažnim gasom (Mokhatab et al., 2006; Speight, 2018; Mićić, 2020). Gas dobijen iz gasno–kondenzatnih ležišta pojavljuje se zajedno sa tečnim ugljovodonicima koji kondenzuju pri površinskim uslovima. Zbog sadržaja težih ugljovodonika, ovi gasovi se nazivaju vlažnim ili bogatim jer su po svom sastavu slični sa gasovima iz gasno–naftnih ležišta. Teži ugljovodonici se pri snižavanju temperature kondenzuju i ponovo prelaze u tečno stanje kao prirodni gazolin ili kondenzat. Ova ležišta odlikuju se visokim pritiscima preko 30 MPa i visokim temperaturama iznad 100 °C (Mokhatab et al., 2006; Speight, 2018; Mićić, 2020).

Bitno je napomenuti da se prirodni gas, pored konvencionalnih, može dobiti i iz nekonvencionalnih ležišta, primenom specijalizovanih tehnologija ekstrakcije. Metan hidrati *(engl. Methane Hydrate)*, na primer, predstavljaju gas zarobljen u kristalnoj strukturi leda ili u dubokim okeanskim sedimentima. Ekstrakcija ovog gasa uključuje razbijanje hidratne strukture kroz kontrolisano zagrevanje ili snižavanje pritiska, što omogućava oslobađanje metana (Ahmadi and Smith, 2007; You, Flemings, Malinverno, Collett and Darnell, 2019). Gas iz škriljaca *(engl. Shale Gas)* se dobija iz ležišta uljnih škriljaca, gustih sitnozrnastih sedimentnih stena sa promenljivim sadržajem organske materije iz kojih se ekstrakcija gasa vrši pomoću tehnika poput bušenja i hidrauličkog frakturiranja. Ove metode omogućavaju pristup gasu koji bi inače ostao zarobljen u nepristupačnim slojevima stena (Ignjatović, Ljubojev, Mitić i Stojanović, 2009; Centner, 2013). Gas prisutan u slojevima uglja, poznat i kao ležišni metan *(engl. Coal Bed Methane)*, vezan je za ugljenične slojeve u kopovima uglja. Njegova ekstrakcija uključuje metode oslobađanja gasa smanjenjem pritiska u sloju, a jedna od metoda je primena vode, tzv. ulivanje (Moore, 2012). Kako je prethodno pomenuto, biogas nastaje anaerobnim iz biomase, dok se poizvodnja zasniva na tehnologijama prikupljanja metana tokom prirodnog procesa razlaganja (Weiland, 2010; Pušin i Katić, 2019). Nekonvencionalni izvori prirodnog gasa imaju značajan potencijal za globalni energetski

sektor ali i za energetski sektor Republike Srbije, jer omogućavaju eksploataciju resursa koji ranije nisu bili komercijalno dostupni. Oni mogu doprineti diverzifikaciji energetskih izvora, kroz smanjenje zavisnosti od tradicionalnih načina dobijanja gasa i fosilnih goriva, prvenstveno kao dodatna opcija za snabdevanje energentima. Pored navedenog, razvoj tehnologija za eksploataciju gasa iz ovih izvora ima značajne ekonomske i geopolitičke implikacije, jer omogućava mnogim državama da povećaju svoju energetsku nezavisnost.

Hemijski sastav prirodnog gasa iz gasnog, gasno–naftnog i gasno–kondenzatnog ležišta, prikazan je u Tabeli 42. Ovaj tipični hemijski sastav, izražen u molarnim procentima, obuhvata glavne ugljovodonične komponente (metan, etan, propan, butan i teže ugljovodonike), kao i neugljovodonične primese (poput azota i ugljen-dioksida). Pažnja je usmerena na razlike u udelu glavnih komponenata, tj. kako njihov udeo varira s obzirom na tip ležišta i metode ekstrakcije.

U datom kontekstu, Tabela 42 pruža pregledan i jasan uvid u hemijski sastav prirodnog gasa iz konvencionalnih ležišta, olakšavajući razumevanje uticaja varijabilnosti njegovih hemijskih karakteristika na procese transporta, prvenstveno na procene transportovanih količina gasa po vozilu–nadgradnji.

Tabela 41. Hemijski sastav prirodnog gasa iz konvencionalnih ležišta

Sastav gasa u molarnim procentima [mol %]

Komponenta	Hemijska oznaka	Suvi gas	Vlažni gas	Kondenzat
Metan	CH_4	86,12	92,46	73,19
Etan	C_2H_6	5,91	3,18	7,80
Propan	C_3H_8	3,58	1,01	3,55
iso-Butan	*i*-C_4H_{10}	1,72	0,28	0,71
n-Butan	*n*-C_4H_{10}	-	0,24	1,45
iso-Pentan	*i*-C_5H_{12}	0,50	0,13	0,64
n-Pentan	*n*-C_5H_{12}	-	0,08	0,68
Ugljen-dioksid	CO_2	0,10	1,41	2,37
Azot	N_2	2,07	0,25	0,31
Ostale primese		-	0,96	9,3

Izvor:
[1] Speight, J. G. (2018). Natural gas: a basic handbook (Eds. 2), tabela 1.4.

U Tabeli 43., naveden je uobičajeni fizičko–hemijski sastav prirodnog gasa koji se uvozi u Republiku Srbiju, koji je u saglasnosti sa propisanim kvalitetom definisanim Uredbom o uslovima isporuke i snabdevanja prirodnim gasom (Uredba, 97/2023). Uredbom su definisane odgovornosti za kvalitet i hemijski sastav gasa, kao i minimalni udeo metana u gasu koji se isporučuje krajnjim korisnicima, a koji ne sme biti manji od 92%.

Tabela 42. Fizičko–hemijski sastav uvoznog prirodnog gasa u Republici Srbiji

Sastav prirodnog gasa u molarnim procentima [mol %]

Naziv	Metan	Etan	Propan	*iso*-Butan	*n*-Butan	*iso*-Pentan	Azot	Ugljen-dioksid	Ostale primese
Hemijska oznaka	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_4H_{10}	C_5H_{12}	N_2	CO_2	-
[mol %]	96,180	1,620	0,500	0,080	0,080	0,010	0,990	0,510	0,030
Gustina gasa	0,711	kg/m^3							
Molarna masa	16,426	g/mol							

Izvor:
[1] Srbija gas, dostupno na: www.srbijagas.com;

Prirodni gas koji se uvozi u Republiku Srbiju, pretežno se sastoji od metana, koji čini najveći udeo sastava preko 96%. Pored metana, gas sadrži manje količine etana, propana, butana i drugih težih ugljovodonika. Takođe, prisutne su i neznatne količine nečistoća poput ugljen–dioksida, azota, kao i ostalih primesa.

Kontekst razumevanja fizičko–hemijskog sastava gasa kao pogonskog energenta od izuzetne je važnosti prilikom tehničkih analiza efikasnosti određenih sistema koji svoju primenu nalaze u raznim privrednim sektorima, poput industrije, saobraćaja, domaćinstva, poljoprivrede i dr. Sastav gasa od velike je važnosti prilikom analiza efikasnosti vozila i nadgradnji, prvenstveno u svrhu ostvarivanja boljih performansi, niže potrošnje goriva i izduvne emisije, ali i kroz bolja masena iskorišćenja vozila, transport većih količina gasa po vožnji i procene potrebnih zapreminskih kapaciteta (potrebnog broja vozila i nadgradnji za realizaciju transportnog zadatka). U saglasnosti sa navedenim, u narednom odeljku rada analiziraju se fizička svojstva gasa na procenu transportovanih količina po vozilu i nadgradnji, kao i potrebnih zapreminskih kapaciteta za transport određenih količina gasa (Vašalić i ostali, 2026).

6.2.2 Fizička svojstva i karakteristike gasova

U domenu gasova kao materija, postoje određeni fundamentalni zakoni i relacije, kako za idealne tako i za realne gasove. Navedeni zakoni pomažu da se objasne i opišu njihova svojstva i karakteristike. Jedna od osnovnih relacija odnosi se na međusobni uticaj zapremine, pritiska i temperature gasa. U tim relacijama jasno se vidi na koji način promena jednog od ovih parametara utiče na preostala dva, što čini osnovu za razumevanje ponašanja gasova u različitim uslovima (Đorđević, Valent, Šerbanović i Radojković, 1989; Đorđević i ostali, 2005; Mokhatab et al., 2006; Bogner i Isailović, 2008; Speight, 2018; Mićić, 2020). Pri praktičnoj primeni gasova često se postavljaju pitanja poput (Bogner i Isailović, 2016):

- Kako odrediti količinu gasa u rezervoaru/boci/posudi pod pritiskom, na osnovu poznatih vrednosti pritiska, temperature i zapremine?

- Kako odrediti zapreminu rezervoara/boce/posude pod pritiskom za transport određene količine gasa, na osnovu poznatih vrednosti pritiska i temperature?

U ovom odeljku i narednim pododeljcima izložene su fizičke osnove koje služe za rešavanje tehničkih pitanja obrađenih u ovoj disertaciji, kao i za funkcionisanje razvijenog modela procene transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta. Ipak, ovi postupci ni na koji način ne zamenjuju stručnu literaturu iz oblasti gasne tehnike i termodinamike.

Efikasnost vozila i nadgradnje određuje se na osnovu velikog broja tehničkih, ekonomskih i ekoloških parametara, tj. ocenjuje se na osnovu parametara koji zavise od njihove namene i svrhe korišćenja. Pravilna analiza ovih parametara omogućava veću produktivnost (transport većih količina robe kroz angažovanje manje transportnih kapaciteta i dr.), optimizaciju troškova, kao i smanjenje štetnog uticaja na životnu sredinu. Ključni parametri uključuju: proizvodnost (izraženu odnosom ukupno prevezenih tona robe i ukupno pređenih kilometara), zatim specifičnu potrošnju goriva (izraženu kao odnos ukupno potrošenog goriva i ukupno pređenih kilometara ili tona tereta), ali i parametre koji obuhvataju interne i eksterne troškove. Jedni od internih troškova su i troškovi goriva, koji se često predstavljaju odnosom jediničnog troška goriva po pređenom kilometru. Pored internih, prisutni su i eksterni troškovi, koji su prvenstveno uvedeni kao odgovor na kontrolu zagađenja i izduvne emisije gasova koji utiču na efekat staklene bašte emitovanih od privrednih sektora, uključujući i saobraćajni. Kao i u slučaju internih, eksterni troškovi često se predstavljaju odnosom jediničnog troška po pređenom kilometru ili jediničnog troška po tonskom kilometru. Poslednjih nekoliko decenija na svetskom nivou ali i kroz nacionalne planove i strategije (Strategija, 2024), posebna pažnja

se usmerava na primenu modela za dodatna oporezivanja emisije izduvnih gasova, pre svega gasova koji doprinose stvaranju efekta staklene bašte (navedeno u Poglavlju 3 i 5).

Kako je u prethodnim odeljcima rada navedeno, u zavisnosti od zahtevanih količina gasa ali i zahtevane tačnosti rezultata, u postupcima procene količine gasa po vozilu–nadgradnji i potrebnih zapreminskih kapaciteta, mogu se koristiti metode zasnovane na jednačini stanja idealnog gasa ili jednačini stanja realnog gasa. Ukoliko se zahteva viša tačnost, tj. rezultati koji više odgovaraju realnim uslovima eksploatacije, svrsishodnije je koristiti modele zasnovane na jednačini stanja realnog gasa.

6.2.3 Jednačina stanja idealnog gasa

Idealnim gasom smatra se gas čije stanje u potpunosti odgovara jednačini stanja idealnog gasa [1.45], tj. podrazumeva da je gas sačinjen od tačkastih čestica, pri čemu međusobni sudari i sudari sa zidovima (posuda, rezervoara) ne utiču na unutrašnju kinetičku energiju i ne menjaju međusobna dejstva među česticama (Sadžaković, Antonić, Glušica i Bogner, 2015; Bogner i Isailović, 2016). Određivanje fizičkih osobina jedne od faza, odnosno njenog stanja, mogu se definisati pomoću veličina stanja kao što su pritisak, zapremina i temperatura (*PVT*), a odnos ovih veličina dat je izrazom [1.45] (Đorđević i ostali, 1989; Đorđević i ostali, 2005; Bogner i Isailović, 2016).

$$PV = nRT = \frac{m}{M} R_u T \qquad [1.45]$$

gde su: P – pritisak, V – zapremina, n – količina materije (broj molova), T – temperatura, m – masa, M – molarna masa i R_u – univerzalna gasna konstanta.

Gustina jednog gasa ($\rho_{P,T}$), u skladu sa jednačinom idealnog gasa [1.45], za date vrednosti pritiska i temperature, određuje se primenom izraza [1.46].

$$\rho_{P,T} = \frac{m}{V} = \frac{PM}{R_u T} \qquad [1.46]$$

U tehničkim proračunima, za normalne uslove obično se uzimaju temperatura T_n = 273,15 K (t_n = 0 °C) i pritisak P_n = 1,01325 bar. Međutim, za industrijske uslove u Evropi najčešće se koriste takozvani standardni uslovi, koji odgovaraju temperaturi T_s = 288,15 K (t_s = 15 °C) i pritisku P_s = 1 bar (Sadžaković i ostali, 2015; Bogner i Isailović, 2016). Gasna konstanta R_g predstavlja karakteristiku datog gasa i definiše se odnosom univerzalne gasne konstante R_u (R_u = 8,314 J/molK) i molarne mase gasa M (Đorđević i ostali, 1989; Đorđević i ostali, 2005).

U skladu sa jednačinom idealnog gasa [1.45], molarna gustina gasa (ρ_m) određuje se primenom izraza [1.47].

$$\rho_m = \frac{1}{V_m} = \frac{n}{V} = \frac{P}{R_u T} \qquad [1.47]$$

Vrednosti molarne zapremine idealnog gasa, za normalne uslove (T_n = 273,15 K (t_n = 0 °C) i P_n = 1,01325 bar), iznose V_{mn} = 22,413 m^3/kmol. Vrednosti molarne zapremine idealnog gasa,

za standardne uslove (industrijske, T_s = 288,15 K (t_s = 15 °C) i P_s = 1 bar), iznose V_{ms} = 23,957 m^3/kmol (Kaye and Laby, 1995).

Proračun zapremine gasa $V_{P,T}$ za odgovarajuće radne uslove pritiska i temperature na standardne uslove (P_s i T_s), kao i obrnuto, može se izvršiti (pod uslovom da je moguća primena jednačine stanja idealnog gasa) pomoću izraza [1.48] i [1.49], proisteklih iz Bojl–Mariotovog *(engl. Boyle-Mariotte)* i Gej–Lisakovog *(engl. Gay-Lussac's)* zakona (Đorđević i ostali, 2005; Sadžaković i ostali, 2015; Bogner i Isailović, 2016).

Jednačina Bojl–Mariota za uslove konstantne temperature ($T = const$) [1.48], glasi:

$$V_{P,T} = V_{P,t=0\,°C} \times \frac{V_s P_s}{P} = \frac{const}{P} \qquad [1.48]$$

Jednačina Gej–Lisaka za uslove konstantnog pritiska ($P = const$) [1.49], glasi:

$$V_{P,T} = V_{P,t=0\,°C} \times \frac{T}{273{,}15} = V_{P,t=0\,°C} \times \frac{273{,}15 + t}{273{,}15} \qquad [1.49]$$

U skladu sa prethodno navedenim, u Tabeli 44., prikazana su odstupanja između izračunatih vrednosti idealne i realne zapremine jednog dela najčešćih tehničkih gasova. Odstupanja su prikazana za temperaturne uslove od T_s = 288,15 K (t_s = 15 °C) i različite radne pritiske (10 i 200 bar) (Đorđević i ostali, 2005; Sadžaković i ostali, 2015; Bogner i Isailović, 2016). Navedena odstupanja odnose se na tehničke gasove: argon (*Ar*), azot (N_2), ugljen–dioksid CO_2, kiseonik O_2, vodonik H_2 i prirodni gas (aproksimiran konstantama metana CH_4). Ukoliko se ne zahteva visoka tačnost, u oblastima nižih pritisaka i pri daleko višim temperaturama od kritične temperature t_c, u modelima procena mogu se koristiti jednačine stanja idealnog gasa.

Tabela 43. Odstupanja "idealne" i realne zapremine gasa nekih tehničkih gasova

Gas	Kritična temperatura t_c [°C]	Odstupanje [%]	
		p = 10 [bar], t = 15 [°C]	p = 200 [bar], t = 15 [°C]
Argon (Ar)	– 122,29	– 0,7	– 6,1
Azot (N_2)	– 146,95	– 0,3	+ 5,0
Ugljen-dioksid (CO_2)	+ 31,06	– 5,3	Tečna faza
Kiseonik (O_2)	– 118,57	– 0,7	– 6,1
Vodonik (H_2)	– 239,96	+ 0,6	+ 13,0
Prirodni gas*	– 82,60	– 1,8	– 20,0

Izvor:
[1] Đorđević i ostali, 2005, tabela P.1.
[2] Bogner i Isailović, 2016, tabela 2.1.
*Prirodni gas se uglavnom sastoji od metana, pa se njegove konstante aproksimiraju konstantama metana.

Tehnički gasovi poput azota, argona i vodonika pokazuju manja odstupanja pri nižim pritiscima, s obzirom na to da su daleko od svojih kritičnih temperatura. Međutim, pri pritisku od 200 bar, odstupanja postaju izraženija, posebno kod vodonika, prirodnog gasa i ugljen–dioksida. Ugljen–dioksid pokazuje najveća odstupanja, jer mu je kritična temperatura blizu radnim uslovima. Vodonik i prirodni gas pokazuju umerena odstupanja, pri pritisku od 10 bar, ali značajnija odstupanja pri pritisku od 200 bar. Ipak, sastav prirodnog gasa može varirati u zavisnosti od izvora (navedeno u prethodnim odeljcima ovog poglavlja). Zbog toga se ove konstante mogu koristiti samo kao aproksimacija. Za preciznije proračune preporučuje se određivanje specifičnih konstanti na osnovu analize tačnog hemijskog sastava prirodnog gasa. Ovakvi tabelarni prikazi, podržani proračunima, pružaju jasan uvid u odstupanja između

idealnog i realnog ponašanja gasova pri različitim pritiscima, što je ključno za precizne inženjerske analize.

6.2.4 Jednačina stanja realnog gasa

Realnim gasom smatra se gas čije stanje ne odgovara zakonima i jednačini stanja idealnog gasa [1.45]. Jednačina stanja realnog gasa opisuje međusobnu zavisnost pritiska, temperature i zapremine supstancije, pritom uzimajući u obzir odstupanja od idealnog gasa usled međumolekulskih sila i konačne zapremine molekula. Razvoj jednačina stanja za realne gasove zasniva se na dva osnovna pristupa, analitičkom i empirijskom. Prvi pristup uključuje uvođenje konstanti u jednačinu stanja idealnog gasa, na ovom principu zasniva se široka grupa analitičkih jednačina stanja. S druge strane određivanje konstanti u zavisnosti je od složenosti jednačine. Naime, kod jednostavnijih modela, konstante se mogu preuzeti iz dostupnih tabličnih vrednosti za određenu supstancu, dok se kod složenijih modela konstante najčešće određuju eksperimentalnim putem. Drugi pristup se zasniva na korekciji jednačine idealnog gasa [1.45] primenom empirijskog faktora kompresibilnosti (Đorđević i ostali, 1989; Kaye and Laby, 1995; Lide, 2004; Đorđević i ostali, 2005).

Primer jednačina stanja realnog gasa prvog pristupa su: Van der Valsova *(engl. Van der Waals)* [1.50] i Saoveova *(engl. Soave)* [1.53]. Van der Valsova jednačina stanja realnog gasa, za jedan kmol gasa glasi:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^{\,2}} \qquad [1.50]$$

gde su a i b konstante (poznate i kao Van der Valsove konstante) koje uzimaju u obzir međumolekulske sile (a) i veličinu molekula (b), što je pri definisanju idealnog gasa zanemareno. Konstante a i b zavise od prirode gasa. Van der Valsove konstante a i b mogu se odrediti preko kritičnog pritiska i kritične temperature primenom izraza [1.51] i [1.52], tj. na vrednostima na kojima dolazi do faznih prelaza između gasnog i tečnog stanja (Đorđević i ostali, 1989; Kaye and Laby, 1995; Lide, 2004; Đorđević i ostali, 2005).

Konstante u zavisnosti od kritičnog pritiska i kritične temperature:

$$a = \frac{27}{64}\,\frac{R^2 T_c^{\,2}}{P_c} \quad ; \quad b = \frac{1}{8}\,\frac{RT_c}{P_c} \qquad [1.51]$$

Konstante u zavisnosti od kritičnog pritiska i kritične molarne zapremine:

$$a = 3P_c\,V_{mc}^{\,2} \quad ; \quad b = \frac{1}{3}\,V_{mc} \qquad [1.52]$$

Vrednosti Van der Valsovih konstanti, kritičnog pritiska P_c, kritične temperature T_c (t_c) i kritične molarne zapremine V_{mc}, za poznate tehničke gasove, prikazane su u Tabeli 45. Van der Valsova jednačina uvodi korekcije za intermolekulske sile i zapreminu molekula i koristi se za opisivanje ponašanja gasova na visokim pritiscima i umerenim i niskim temperaturama. Pri niskim pritiscima ili temperaturama blizu kritične tačke, jednačina može poslužiti samo za

približno razumevanje ponašanja realnih gasova, ali nije pogodna za precizne tehničke proračune (Đorđević i ostali, 1989; Lide, 2004; Đorđević i ostali, 2005).

Tabela 44. Kritične veličine i Van der Valsove konstante realnih gasova

Gas	t_c [°C]	p_c [bar]	V_{mc} [L/mol]	konstante a i b	
				a [bar L^2/mol^2]	b [L/mol]
Argon (Ar)	– 122,290	48,740	0,074	1,355	0,032
Azot (N_2)	– 146,950	33,950	0,089	1,370	0,038
Ugljen-dioksid (CO_2)	+ 31,060	73,770	0,094	3,658	0,042
Kiseonik (O_2)	– 118,570	50,460	0,073	1,382	0,031
Metan (CH_4)	– 82,600	46,000	0,099	2,303	0,043
Vodonik (H_2)	– 239,960	12,970	0,065	0,245	0,026
Prirodni gas*	– 82,600	46,000	0,099	2,303	0,043

Izvor:
[1] Lide, 2004, Van Der Waals Constants For Gases
[2] Đorđević i ostali, 1989, Đorđević i ostal, 2005, tabela P.1.
[3] The LibreTexts libraries, https://chem.libretexts, tabela A8.1.
*Prirodni gas se uglavnom sastoji od metana, pa se njegove konstante aproksimiraju konstantama metana.

Saoveova jednačina stanja realnog gasa, za jedan kmol gasa glasi:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m\left(V_m + b\right)} \qquad [1.53]$$

Saoveova jednačina stanja realnog gasa [1.53] jedna je od najčešće korišćenih u praksi. Soave je unapredio Redlih–Kvang *(engl. Redlich–Kwong)* jednačinu stanja uvođenjem korekcije za parametar a, koji je u zavisnosti od temperature i faktora acentričnosti. Faktor acentričnosti uzima u obzir uticaj nesferičnosti molekula na osobine fluida, čime je poboljšano predviđanje ponašanja realnih gasova, posebno u širokom opsegu pritisaka i temperatura. Jednačina stanja [1.53] koristi se za opisivanje ponašanja gasova na visokim pritiscima i niskim temperaturama. Poboljšano je predviđanje faznih promena (posebno tečnost–gas), što je čini pogodnom za industrijske primene i proračune. Međutim, Soaveova jednačina je manje precizna pri niskim pritiscima i visokim temperaturama (Đorđević i ostali, 1989; Lide, 2004; Đorđević i ostali, 2005).

Drugi pristup koji se koristi za opisivanje stanja realnog gasa je uvođenje faktora kompresibilnosti, tj. da se jednačina stanja idealnog gasa koriguje preko empirijski utvrđenog faktora kompresibilnosti, koji se u literaturi naziva i faktor realnog gasa *($Z_{P,T}$)* (Kaye and Laby, 1995; Lide, 2004; Đorđević i ostali, 2005; Sadžaković i ostali, 2015). Za potrebe opisivanja stanja realnog gasa, posebno pri visokim pritiscima i umerenim do niskim temperaturama, tj. kada se gas približava faznoj promeni, primenjuje se faktor kompresibilnosti $Z_{P,T}$. Faktorom kompresibilnosti opisuje odstupanje "idealnih" vrednosti dobijenih primenom jednačine stanja idealnog gasa od realnih vrednosti u zavisnosti od pritiska i temperature. Kao takav predstavlja praktičan i univerzalan pristup za inženjerske analize i tehničke proračune. Primena se isključivo odnosi na gasnu fazu, uz pretpostavku da se u rezervoarima (posudama) ne nalazi kondenzat (Sadžaković i ostali, 2015; Bogner i Isailović, 2016).

Pomoću jednačine idealnog gasa [1.45] za odgovarajuće vrednosti pritiska i temperature određuje se faktor kompresibilnosti:

$$Z_{P,T} = \frac{PV}{nR_uT} \qquad [1.54]$$

Faktor kompresibilnosti za idealan gas iznosi $Z_{P,T} = 1$. U slučaju realnog gasa, postoje dve relacije. Prva relacija kada je $Z_{P,T} < 1$, znači da je gas više kompresibilan od idealnog gasa pri istom pritisku i temperaturi, odnosno, da određena posuda zapremine *V*, sadrži veću količinu gasa od izračunate primenom jednačine stanja idealnog gasa [1.45]. Druga relacija kada je $Z_{P,T} > 1$, znači da određena posuda zapremine *V* sadrži manju količinu gasa (Sadžaković i ostali, 2015, Bogner i Isailović, 2016).

Vrednosti faktora kompresibilnosti za većinu poznatih tehničkih gasova mogu se odrediti analitičkim putem, primenom složenih jednakosti koje uzimaju u obzir zavisnosti pritiska, temperature ili gustine (Kaye and Laby, 1995; Lide, 2004; Đorđević i ostali, 2005; Sadžaković i ostali, 2015; Bogner i Isailović, 2016), očitati dijagramski (GPSA, 2004) ili odrediti pomoću dostupnih tabličnih vrednosti, navedenih u prilogu rada (Prilog 3, Tabela P3.1) (Sadžaković i ostali, 2015). Izbor metode procene (primena navedenih jednakosti koje opisuju realno stanje gasova), zavisi od specifičnih uslova pritiska i temperature, dostupnosti podataka, kao i od početnih zahteva tačnosti proračuna ili inženjerskih analiza. U okviru razmatranja i navedenih prednosti, ali i ograničenja prethodnih jednakosti koje opisuju realno stanje gasova, za potrebe modela procene transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta, primenjen je postupak zasnovan na faktoru kompresibilnosti $Z_{P,T}$.

6.3 Određivanje transportovane količine gasa po vozilu–nadgradnji

U ovom odeljku opisan je postupak određivanja količine gasa po vozilu–nadgradnji na osnovu poznatih vrednosti pritiska, temperature i zapremine. Postupak određivanja količine gasa u posudama, kod baterijskih vozila ili MEGC nadgradnji, obuhvata uticaje koji proističu od tipa posuda (tehničke karakteristike, materijal izrade, zapremina i radni pritisak), faktora kompresibilnosti gasa koji se transportuje kao i temperaturnih uslova okoline (Chen et. al.,2010; Vašalić i ostali, 2024; 2025).

Količina gasa po vožnji za razmatrane skupove vozila navedene u Tabeli 24, primenom prezentovanog modela na Slici 52., određena je na osnovu izraza [1.55], gde je $n=m/M$:

$$P_n V_n = Z_{P,T} n R_u T \quad \Rightarrow \quad PV = \frac{Z_{P,T} m_{t,n} R_u T}{M} \quad \Rightarrow \quad m_{t,n} = \frac{P_n V_n M}{Z_{P,T} R_u \left(t + 273{,}15\right)} \qquad [1.55]$$

gde su: $m_{t,n}$ – količina transportovanog gasa [kg], P_n – radni pritisak posude, u zavisnosti od tipa posuda *n* [MPa], V_n – zapremina, u zavisnosti od tipa posuda [dm³], T – temperatura [K], t – temperatura [°C], M – molarna masa [g/mol], R_u – univerzalna gasna konstanta [J/molK], i $Z_{P,T}$ – faktor kompresibilnosti.

Rezultati modela procene transportovanih količina gasa po vožnji razmatranih skupova vozila, opremljenih uređajima i opremom za skladištenje i transport komprimovanog prirodnog gasa (navedeno u Tabelama 21 i 22), prikazani su u Tabeli 46. Vrednosti molarne mase gasa i faktora kompresibilnosti $Z_{p,T}$ određene su na osnovu podataka iz Tabele 43 i Tabela P3.1 (navedeno u prilogu ovog rada). Primenom podatka o molarnoj masi gasa M = 16,426 g/mol i faktora kompresibilnosti $Z_{p,T}$, za vrednosti pritiska P = 200 bar (p = 20 MPa), P = 250 bar (p = 25 MPa) i temperature: t_1 = 0 °C (T_1 = 273,15 K); t_2 = 10 °C (T_2 = 288,15 K); t_3 = 15 °C (T_3 = 288,15 K); t_4 = 20 °C (T_4 = 293,15 K); t_5 = 30 °C, (T_5 = 303,15 K); i t_6 = 50 °C, (T_6 = 323,15 K), određene su količine transportovanog gasa po vožnji, date u Tabeli 46.

Tabela 45. Proračun količine gasa u zavisnosti od tipa posuda, radne zapremine, pritiska i temperature

Baterijsko vozilo – poluprikolica											
Gas: Prirodni gas*											
UN oznaka transportovane robe UN 1971											
Materijal izrade posuda/tip posuda: čelik/ Tip–1											
Zapremina: 22350 [dm^3]											
Radni pritisak: 200 [bar]											
t_1 = 0 [°C]		t_2 = 10 [°C]		t_3 = 15 [°C]		t_4 = 20 [°C]		t_5 = 30 [°C]		t_6 = 50 [°C]	
$Z_{P,T}$	m_1 [kg]	$Z_{P,T}$	m_2 [kg]	$Z_{P,T}$	m_3 [kg]	$Z_{P,T}$	m_4 [kg]	$Z_{P,T}$	m_5 [kg]	$Z_{P,T}$	m_6 [kg]
0,7589	4260	0,7866	3965	0,7980	3841	0,8130	3705	0,8373	3479	0,8795	3107
MEGC – poluprikolica											
Gas: Prirodni gas*											
UN oznaka transportovane robe UN 1971											
Materijal izrade posuda/tip posuda: kompozit/ Tip–4											
Zapremina: 39900 [dm^3]											
Radni pritisak: 200 [bar]											
t_1 = 0 [°C]		t_2 = 10 [°C]		t_3 = 15 [°C]		t_4 = 20 [°C]		t_5 = 30 [°C]		t_6 = 50 [°C]	
$Z_{P,T}$	m_1 [kg]	$Z_{P,T}$	m_2 [kg]	$Z_{P,T}$	m_3 [kg]	$Z_{P,T}$	m_4 [kg]	$Z_{P,T}$	m_5 [kg]	$Z_{P,T}$	m_6 [kg]
0,7589	7605	0,7866	7078	0,7980	6856	0,8130	6615	0,8373	6211	0,8795	5547
MEGC – poluprikolica											
Gas: Prirodni gas*											
UN oznaka transportovane robe UN 1971											
Materijal izrade posuda/tip posuda: kompozit/ Tip–4											
Zapremina: 39900 [dm^3]											
Radni pritisak: 250 [bar]											
t_1 = 0 [°C]		t_2 = 10 [°C]		t_3 = 15 [°C]		t_4 = 20 [°C]		t_5 = 30 [°C]		t_6 = 50 [°C]	
$Z_{P,T}$	m_1 [kg]	$Z_{P,T}$	m_2 [kg]	$Z_{P,T}$	m_3 [kg]	$Z_{P,T}$	m_4 [kg]	$Z_{P,T}$	m_5 [kg]	$Z_{P,T}$	m_6 [kg]
0,8104	8902	0,8303	8382	0,8410	8132	0,8503	7906	0,8699	7473	0,9059	6731
Baterijsko vozilo – prikolica											
Gas: Prirodni gas*											
UN oznaka transportovane robe UN 1971											
Materijal izrade posuda/tip posuda: čelik/ Tip–1											
Zapremina: 11700 [dm^3]											
Radni pritisak: 200 [bar]											
t_1 = 0 [°C]		t_2 = 10 [°C]		t_3 = 15 [°C]		t_4 = 20 [°C]		t_5 = 30 [°C]		t_6 = 50 [°C]	
$Z_{P,T}$	m_1 [kg]	$Z_{P,T}$	m_2 [kg]	$Z_{P,T}$	m_3 [kg]	$Z_{P,T}$	m_4 [kg]	$Z_{P,T}$	m_5 [kg]	$Z_{P,T}$	m_6 [kg]
0,7589	2230	0,7866	2075	0,7980	2010	0,8130	1939	0,8373	1821	0,8795	1626
MEGC – prikolica											
Gas: Prirodni gas*											
UN oznaka transportovane robe UN 1971											
Materijal izrade posuda/tip posuda: kompozit/ Tip–4											
Zapremina: 18900 [dm^3]											
Radni pritisak: 250 [bar]											
t_1 = 0 [°C]		t_2 = 10 [°C]		t_3 = 15 [°C]		t_4 = 20 [°C]		t_5 = 30 [°C]		t_6 = 50 [°C]	
$Z_{P,T}$	m_1 [kg]	$Z_{P,T}$	m_2 [kg]	$Z_{P,T}$	m_3 [kg]	$Z_{P,T}$	m_4 [kg]	$Z_{P,T}$	m_5 [kg]	$Z_{P,T}$	m_6 [kg]
0,8104	4217	0,8303	3970	0,8410	3852	0,8503	3745	0,8699	3539	0,9059	3188
*Prirodni gas se uglavnom sastoji od metana, pa se njegove konstante aproksimiraju konstantama metana.											

U Tabeli 46., prikazane su određene količine prirodnog gasa, izražene u kilogramima, u zavisnosti od temperature okoline, tipa posuda, ukupne zapremine i radnog pritiska posuda i faktora kompresibilnosti. Rezultati su prikazani za priključna vozila sa dva tipa nadgradnji, posudama izrađenim od čelika i posudama izrađenenim od kompozitnih materijala. U slučaju sastava kamiona i prikolica, nadgradnje na kamionskim šasijama odgovaraju nadgradnjama na prikolicama. Analiza je izvršena sa aspekta tehničkih karakteristika posuda (radnih pritisaka i zapreminskih kapaciteta) i temperaturnih uticaja na potencijalne transportovane količine gasa po vožnji. Temperaturni uticaji razmatrani su u širem opsegu (od 0 °C do 50 °C), prvenstveno radi ilustracije razlika u količinama komprimovanog gasa. Takođe, poređenje je izvršeno za industrijske uslove u Evropi, tzv. standardne uslove (t_s = 15 °C), najčešće kataloške vrednosti proizvođača. Faktor kompresibilnosti $Z_{P,T}$ raste sa porastom temperature, što ukazuje na

odstupanje realnog gasa od idealnog stanja, pri datom pritisku i temperaturi (navedeno u prethodnom odeljku). Količina gasa opada sa porastom temperature, usled povećanja faktora $Z_{P,T}$.

Bitno je i napomenuti da su u svetu prisutne i savremene kompresorske stanice, opremljene uređajima ili halama za kondicioniranje (mogućnost ulaska kompletnih vozila), koje održavaju temperaturu komprimovanja u određenom opsegu sa kojim je omogućeno potpunije iskorišćenje posuda. Svakako, uticaj radnog pritiska i temperaturnih uslova na transportovane količine gasa je primetan. Kao primer navedenom, promena temperaturnih uslova za slučaj baterijskog vozila – poluprikolice opremljene sa posudama izrađenim od čelika utiče na smanjenje transportovane mase gasa po vožnji za oko 27%. Naime, za radne uslove od 200 bar na 0 °C i faktoru kompresibilnosti 0,7589, skladištena masa gasa je najveća i iznosi 4260 kg, dok je faktor kompresibilnosti najmanji. Nasuprot tome, pri 50 °C masa gasa je najmanja 3107 kg, dok je faktor kompresibilnosti najveći i iznosi 0,8795. Ukoliko se uporede vrednosti transportovanih količina gasa sa poluprikolicom opremljenom sa MEGC nadgradnjom i posudama od kompozitnih materijala, količine su izraženije. Za uslove radnog pritiska 200 bar, pri temperaturi 0 °C i faktoru kompresibilnosti 0,7589 masa gasa iznosi 7605 kg. S druge strane, porastom temperature 50 °C i faktora kompresibilnosti 0,8795, masa gasa iznosi 5547 kg. U slučaju MEGC nadgradnji sa radnim pritiscima od 250 bar, razlike u vrednostima su još naglašenije. Pri temperaturi 0 °C i faktoru kompresibilnosti 0,8104 masa gasa iznosi 8902 kg, dok u slučaju radnih uslova od 50 °C i faktora kompresibilnosti 0,9059 masa gasa iznosi 6731 kg.

Generacijska unapređenja tehničkih karakteristika posuda prvenstveno kompozitnih posuda, ogledaju se u manjim sopstvenim masama, većim zapreminama i radnim pritiscima (navedeno u poglavlju 3). Uticaj unapređenja tehničkih karakteristika, porast radnog pritiska i smanjenje sopstvenih masa posuda, odražavaju se kroz povećanje transportovanih količina gasa po vožnji, koja u proseku iznose oko 16%. U kontekstu prethodno navedenog, ukoliko se uporede količine transportovanog gasa vozila sa posudama izrađenim od čelika i vozila sa posudama izrađenim od kompozitnih materijala, pri radnom pritisku od 200 bar, temperaturnim uslovima od 15 °C i faktoru kompresibilnosti 0,7980, razlike su značajne. Procentualno, vozila sa nadgradnjama opremljenim posudama od kompozitnih materijala transportuju oko 43% više gasa po vožnji. Povećanje radnog pritiska sa 200 bar na 250 bar utiče na efikasnost vozila, koja se prvenstveno ogleda kroz transport većih količina gasa po vožnji. Transport većih količina gasa po vožnji doprinosi boljem iskorišćenju masenih kapaciteta vozila, a šire posmatrano i optimizaciji rada, kroz angažovanje manje transportnih kapaciteta (Vašalić i ostali, 2024, 2025). Međutim, važno je istaći da u procesima komprimovanja gasa sa 200 bar na 250 bar prisutna i značajana razlika u utrošku električne energije koja iznosi oko 30%. Na osnovu toga, prilikom razmatranja nadgradnji neophodno je uzeti u obzir, pored radnih pritiska i zapreminskih kapaciteta, i utrošak energije za potrebe komprimovanja.

Oceni efikasnosti vozila–nadgradnji, doprinosi i specifična masa posuda, koja odgovara odnosu mase prazne posude i mase uskladištenog gasa. Posude Tip–1 čija zapremina iznosi 150 dm^3 imaju masu od 147 kg, dok u slučaju kompozitnih posuda Tip–4 zapremine 350 dm^3, masa iznosi oko 94 kg (navedeno u Tabelama 21 i 22). Za iste radne uslove, tj. radnom pritisku od 200 bar, temperaturi 15 °C i faktoru kompresibilnosti 0,7980, specifična masa posuda kod posuda Tip–1 iznosi 0,175, a kod posuda Tip–4 iznosi 0,800. Uticaj mase praznih posuda izrađenih od kompozitnih materijala na tehnička ograničenja u pogledu najvećih dozvoljenih osovinskih opterećenja vozila je manje značajan u odnosu na uticaj posuda izrađenih od metalnih materijala, prvenstveno čelika. Ograničavajući faktor za broj kompozitnih posuda po

vozilu nisu dozvoljena osovinska opterećenja, već dimenzije tovarnog prostora vozila, prikazano na Slici 53.

Pored navedenog, prethodnom analizom nadgradnji–posuda (Tip–1 i Tip–4) obuhvaćeni su i parametri koji opisuju eksploataciono–tehničke karakteristike posuda, a koji proističu od klasifikacije prema materijalu izrade posuda. Naime, analiza obuhvata i generacijska unapređenjima tehničkih karakteristika posuda, a koja su predstavljena oznakama tipa posuda (Tip–1, Tip–2, Tip–3 i Tip–4), navedeno u poglavlju 3.



Slika 53. Poluprikolice sa MEGC nadgradnjama (levo i desno) i baterijska vozilo (sredina) *(Izvor: Vašalić i ostali, 2024)*

6.4 Određivanje potrebnih zapreminskih kapaciteta

U ovom odeljku rada opisan je postupak za određivanje potrebnih zapreminskih kapaciteta u zavisnosti od raspoloživih voznih kapaciteta i zahtevanih količina gasa na osnovu poznatih vrednosti pritiska i temperature. Prilikom određivanja potrebne zapremine posuda za transport određene količine gasa u baterijskim vozilima ili MEGC nadgradnjama, uzimaju se u obzir zavisnosti koje proističu od tehničkih karakteristika posuda, poput materijala izrade, radnih zapremina i pritisaka, zatim temperaturnih uslova okoline, faktora kompresibilnosti gasa koji se transportuje, kao i eksploatacione karakteristike opasne materije (gasa). Takođe, neophodno je razmotriti i tehničke parametre vozila (najveća dozvoljena masena opterećenja, nosivost, dimenzije i kapacitet tovarnog prostora i dr.) (Vašalić i ostali, 2024, 2025).

Na osnovu početnih uslova i zahtevanih količina gasa, primenom izraza [1.55], odnosno [1.56] određeni su potrebni zapreminski kapaciteti za realizaciju transportnog zadatka:

$$V_n = \frac{m_{t,n} Z_{P,T} R_u (t + 273{,}15)}{P_n M} \qquad [1.56]$$

U Tabeli 47., navedeni su rezultati, tj. potrebni zapreminski kapaciteti za transport 10000 kg prirodnog gasa, u zavisnosti od fizičko–hemijskih karakteristika gasa, tehničkih karakteristika posuda, radnog pritiska i temperature. Pored navedenog, na osnovu određenih zapreminskih kapaciteta za transport zadate količine gasa i raspoloživih vozila–nadgradnji (njihovih zapreminskih kapaciteta), određen je broj vožnji za svaki sastav vozila. Ostvareni rezultati pokazuju kako za konstantne vrednosti radnog pritiska, promena temperaturnih uslova i faktora kompresibilnosti utiču na potrebnu zapreminu za skladištenje gasa. Pre svega, faktor kompresibilnosti postaje sve izraženiji pri višim temperaturama, što treba uzeti u obzir prilikom planiranja transporta, tj. broja vožnji. Naime za radne uslove 200 bar, 0 °C i faktor kompresibilnosti 0,7589, potrebni zapreminski kapaciteti zapremina za transport 10000 kg

prirodnog gasa iznose 52467 dm³, dok na temperaturi od 50 °C potrebna zapremina dostiže 71936 dm³. Nasuprot tome, za radne uslove 250 bar, 0 °C i faktoru kompresibilnosti od 0,8104, potrebna zapremina iznosi 44822 dm³. Za slučaju temperaturnih uslova od 50 °C, pri faktoru kompresibilnosti od 0,9059, zapremina raste na približno 59276 dm³. Poredeći za radne uslove od 200 bar, potrebna zapremina je manja, što ukazuje na bolje iskorišćenje zapremine pri višem pritisku.

Tabela 46. Proračun potrebne zapremine posuda za transport određene količine gasa u zavisnosti od pritiska i temperature

Gas: Prirodni gas*

UN oznaka transportovane robe UN 1971

Zahtevane količine gasa: 10000 [kg]

Molarna masa: 16,426 [g/mol]

Radni pritisak: 200 [bar]

t_1 = 0 [°C]		t_2 = 10 [°C]		t_3 = 15 [°C]		t_4 = 20 [°C]		t_5 = 30 [°C]		t_6 = 50 [°C]	
$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]	$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]	$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]	$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]	$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]	$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]
0,7589	52467	0,7866	56373	0,7980	58200	0,8130	60323	0,8373	64245	0,8795	71936

Radni pritisak: 250 [bar]

t_1 = 0 [°C]		t_2 = 10 [°C]		t_3 = 15 [°C]		t_4 = 20 [°C]		t_5 = 30 [°C]		t_6 = 50 [°C]	
$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]	$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]	$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]	$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]	$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]	$Z_{P,T}$	$V_{P,T}$[dm³]
0,8104	44822	0,8303	47604	0,841	49069	0,8503	50473	0,8699	53397	0,9059	59276

Zavisnost broja vožnji od tipa posuda (zapremine posuda, radnog pritiska, temperature)

Temperaturni uslovi						
	t_1 = 0 [°C]	t_2 = 10 [°C]	t_3 = 15 [°C]	t_4 = 20 [°C]	t_5 = 30 [°C]	t_6 = 50 [°C]
Materijal izrade posuda/tip posuda: kompozit/ Tip–4						
Zapremina: 39900 [dm³]						
Broj vožnji na pritisku 200 [bar]	1,31	1,41	1,46	1,51	1,61	1,80
Broj vožnji na pritisku 250 [bar]	1,12	1,19	1,23	1,26	1,34	1,49
Materijal izrade posuda/tip posuda: čelik/ Tip–1						
Zapremina: 22350 [dm³]						
Broj vožnji na pritisku 200 [bar]	2,35	2,52	2,60	2,70	2,87	3,22
Materijal izrade posuda/tip posuda: čelik/ Tip–1						
Zapremina: 11700 [dm³]						
Broj vožnji na pritisku 200 [bar]	4,48	4,82	4,97	5,16	5,49	6,15
Materijal izrade posuda/tip posuda: kompozit/ Tip–4						
Zapremina: 18900 [dm³]						
Broj vožnji na pritisku 200 [bar]	2,78	2,98	3,08	3,19	3,40	3,81
Broj vožnji na pritisku 250 [bar]	2,37	2,52	2,60	2,67	2,82	3,14

*Prirodni gas se uglavnom sastoji od metana, pa se njegove konstante aproksimiraju konstantama metana.

Na osnovu prethodno izračunatih potrebnih zapreminskih kapaciteta, modelom je sprovedena i analiza broja ciklusa transporta (broja vožnji) u odnosu na raspoložive zapreminske kapacitete. Analiza je prikazala kako promena temperature utiče na broj vožnji, odnosno transportovane količine gasa. Broj vožnji, predstavljen je odnosom između potrebne zapremine za transport određenih količina gasa i raspolozivih zapreminskih kapaciteta vozila–nadgradnje (Tip–1 ili Tip–4).

Razmatrajući zapreminske kapacitete priključnih vozila, tj. poluprikolica sa posudama izrađenim od čelika 22350 dm³ i posudama izrađenim kompozitnih materijala 39900 dm³, razlike u broju vožnji su primetne. Za realizaciju transportnog zadatka, pri radnim uslovima 200 bar i 0 °C, poluprikolice sa posudama izrađenim od čelika u proseku imaju jednu vožnju više od poluprikolice sa posudama izrađenim od kompozita. U slučaju priključnih vozila sa kompozitnim posudama, zapremine 39900 dm³, pri radnom pritisku od 250 bar i sa porastom

temperature, procenjeni broj vožnji u proseku iznosi dve vožnje po sastavu. Nasuprot tome, na nižem radnom pritisku, 200 bar, razlike u masenim iskorišćenjima su još izraženije. Rezultati prikazuju da broj vožnji ostaje isti, ali prisutne su razlike u masenim iskorišćenjima vozila, tj. maseno iskorišćenje opada sa porastom temperature. U slučaju poluprikolica sa posudama izrađenim od čelika i zapreminom od 22350 dm³ i radnim pritiskom od 200 bar, broj vožnji raste u poređenju sa vozilima sa kompozitnim posudama i kreće se od 2,35 vožnji na 0 °C do 3,22 vožnje na 50 °C. Na ovaj način, modelom je omogućena identifikacija odgovarajućeg vozila i nadgradnje u odnosu na raspoložive vozne i zapreminske kapacitete, selektujući ih na osnovu broja vožnji i masenih iskorišćenja vozila.

Ukoliko je vozni park sa mešovitim nadgradnjama, model otvara mogućnost za realizaciju transportnog zadatka angažovanjem mešovitih skupova, po pitanju nadgradnji. Realizacija uključuje transport do punih kapaciteta nadgradnja sa kompozitnim posudama, a ostatak da se izbegne nepotpuno iskorišćenje nadgradnji sa kompozitnim posudama, kroz angažovanje punih kapaciteta nadgradnji sa čeličnim posudama. Pritom, otvorena arhitektura modela omogućava i proširenje ulaznih parametara, poput podataka o procenjenoj potrošnji goriva i izduvnoj emisiji određenog skupa na određenoj trasi, koji takođe mogu doprineti selekciji skupa i dr. Takođe, kao doprinos navedenom angažovanju mešovitih nadgradnji, važno je istaći da projektovani radni vek posuda namenjenih za transport prirodnog gasa 20 godina (detaljno navedeno u Poglavlju 3). U saglasnosti sa prethodnim, za potpuno iskorišćenje nadgradnji za transport prirodnog gasa ali i ostalih tehničkih gasova, potrebno je stalno angažovanje vozila–nadgradnji.

U Tabeli 48., prikazane su razlike između vrednosti količina gasa, transportovanih količina gasa – utvrđenih merenjem na mestu utovara robe i modelom određenih količina gasa za razmatrane skupove vozila. Odstupanje između vrednosti utvrđenih direktnim merenjem i vrednosti određenih modelom iznosi oko dva procenta.

Tabela 47. Odstupanja transportovanih i modelom određenih količina gasa po skupu vozila

UN oznaka transportovane robe UN 1971

R/b.	Oznaka skupa vozila	Oznaka (kod) vozila	Temperatura Odlazak – Dolazak	Ukupna zapremina posuda	Transportovana količina gasa	Modelom određena količina gasa	Odstupanje
			[C°]	[dm³]	[kg]	[kg]	[%]
1	BC + (ST) (Tip–4)	FL	17/21	39900	7863	7990	1,612
2	BC + (ST) (Tip–1)	FL	15/20	22350	3831	3873	1,071
3	BC + (ST) (Tip–4)	FL	18/22	39900	7817	7905	1,117
4	BC + (ST) (Tip–1)	FL	16/18	22350	3806	3848	1,099
5	BC + (ST) (Tip–4)	FL	19/23	39900	7772	7860	1,125
6	BC + (ST) (Tip–1)	FL	15/19	22350	3830	3874	1,150
7	BA (Tip–4) + (T) (Tip–4)*	FL	22/18	37800	7404	7485	1,088
8	BA (Tip–1) + (T) (Tip–1)*	FL	13/11	23400	4066	4111	1,085

*Nadgradnje na kamionskim šasijama odgovaraju nadgradnjama na prikolicama.

Poređenjem modelom dobijenih rezultata sa rezultatima utvrđenim merenjem na mestu utovara robe, mogu se izvući sledeći zaključci. Primena razvijenog modela i navedenih koraka pozitivno utiče na efikasnost i ekonomičnost transporta. Unapređenja se ogledaju kroz bolja masena iskorišćenja vozila i bolja iskorišćenja zapreminskih kapaciteta za zadate transportne uslove. Takođe, bolja iskorišćenja vozila i nadgradnji ogledaju se i kroz smanjenje potrošnje goriva, izduvne emisije i njenih troškova u odnosu na jedinicu transportovanog gasa po vožnji, opisano je u Poglavljima 3, 4 i 5 (Vašalić i ostali, 2024, 2025). Navedeno doprinosi boljoj organizaciji postojećih voznih kapaciteta, kao i odlukama prilikom izbora novih vozila i nadgradnji za skladištenje i transport prirodnog gasa.

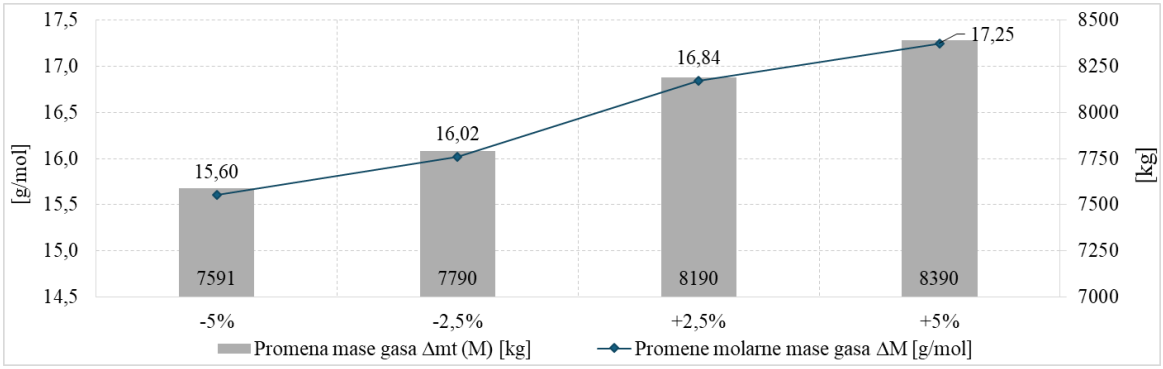
6.5 Analiza osetljivosti modela

Struktura modela postavljena je tako da se masa gasa u posudama procenjuje za skupove vozila u zavisnosti od fizičko–hemijskih svojstava gasa i eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji. Analiza osetljivosti sprovedena je metodom promene jednog parametra. Za potrebe analize razmatrani su uticaji promene molarne mase gasa, radnog pritiska, temperature, zapremine i faktora kompresibilnosti na transportovane količine gasa po skupu vozila. Proračun količine gasa po nadgradnji izvršen je posebno za svaki od navedenih parametara u opsegu –5%, –2,5%, 0%, 2,5% i +5%, prikazano u Tabeli 49. Dobijene vrednosti upoređene su sa referentnim scenarijom (0%), odnosno sa rezultatima dobijenim primenom razvijenog modela.

Tabela 48. Analizirani parametri metode

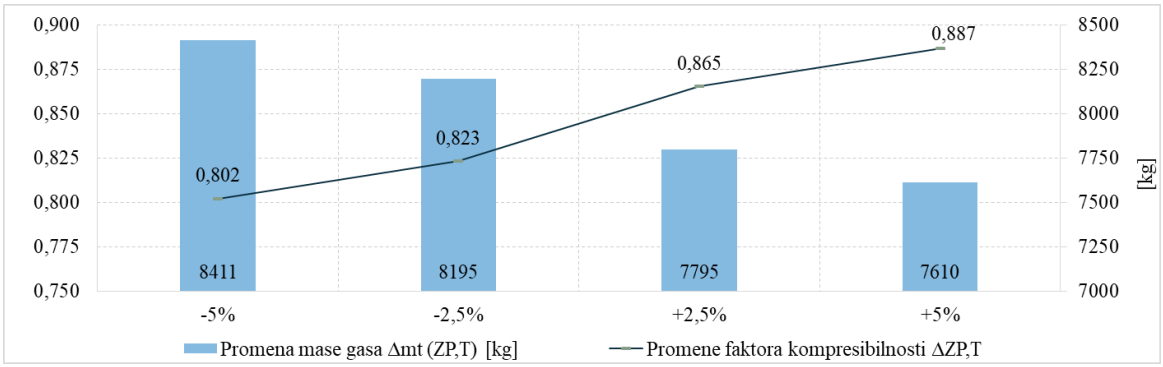
Referentna vrednost mase gasa $m_{t,n}$ 7990 [kg]									
Parametri	Opseg promene					Promena mase gasa $\Delta m_{t,n}$ [kg]			
	–5%	–2,5%	0%	2,5%	5%	–5%	–2,5%	2,5%	5%
Molarna masa *M* [g/mol]	15,60	16,02	16,43	16,84	17,25	7591	7790	8190	8390
Temperatura *t* [C °]	16,15	16,58	17,00	17,43	17,85	8014	8002	7978	7967
Pritisak [MPa]	23,75	24,38	25,00	25,63	26,25	7591	7790	8190	8390
Faktor kompresibilnosti $Z_{P,T}$	0,789	0,810	0,831	0,852	0,872	8411	8195	7795	7610
Zapremina [dm^3]	37050	38025	39000	39975	40950	7591	7790	8190	8390

Uticaj promene ulaznih parametara na količine transportovanog gasa $\Delta m_{t,n}$, prikazan je tabelarno i delom dijagramski na Slikama 54 i 55, radi lakšeg uočavanja trenda promene po razmatranim opsezima. Na Slici 54. prikazana je promena količine gasa u zavisnosti od hemijskih svojstava gasa, gde je trend povećanja mase proporcionalan povećanju molarne mase gasa.



Slika 54. Analiza osetljivosti modela procene transportovanih količina gasa od molarne mase gasa

S druge strane na Slici 55. prikazana je promena mase transportovanog gsa u zavisnosti od faktora kompresibilnosti, gde je trend povećanja mase gasa u posudama obrnuto proporcionalan povećanju faktora kompresibilnosti. Dobijeni rezultati ukazuju na visoku osetljivost modela na promenu ulaznih parametara, pri čemu se masa gasa menja u skladu sa promenama parametara koji zavise od fizičko–hemijskih svojstava gasa, kao i od eksploataciono–tehničkih karakteristika nadgradnji.



Slika 55. Analiza osetljivosti modela procene transportovanih količina gasa od faktora kompresibilnosti

6.6 Zaključna razmatranja

Razmatrani model pruža visoku tačnost i jasan uvid u odnose između procenjenih i transportovanih količina gasa, kao i potrebnih zapreminskih kapaciteta za realizaciju određenog transportnog zadatka u zavisnosti od raspoloživih voznih kapaciteta. Naime, u zavisnosti od raspoloživih voznih kapaciteta (tj. tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, fizičko–hemijskih svojstava gasa i faktora kompresibilnosti) modelom je moguće odrediti potrebne zapreminske kapacitete i broj vožnji u odnosu na zahtevane količine gasa. Pored navedenog, modelom je omogućena identifikacija i izbor optimalnog skupa vozila u odnosu na raspoložive vozne kapacitete, selektujući ih u odnosu na oznaku vozila prema nameni i kodnu oznaku nadgradnje, uslove kompatibilnosti i važnosti sertifikata o odobrenju za vozila. Takođe, u zavisnosti od zahteva i organizacione strukture transportnog preduzeća, otvorena arhitektura modela omogućava proširenje ulaznih parametara koji će doprineti usmerenijoj selekciji vozila i nadgradnji. Navedene mogućnosti i rezultati modela u saglasnosti su sa postavljenim ciljevima o unapređenju efikasnosti procesa drumskog transporta prirodnog gasa, omogućavajući bolje iskorišćenje raspoloživih voznih kapaciteta i ublažavanje negativnih uticaja na životnu sredinu. Takođe, ostvareni rezultati i mogućnost promene ulaznih parametara, razmatranja različitih varijanti i izbora odgovarajućih rešenja dodatno doprinose organizaciji i planiranju postojećih voznih kapaciteta, kao i donošenju odluka prilikom izbora novih vozila i nadgradnji. Ograničenja modela ogledaju se prvenstveno u dostupnosti i kvalitetu ulaznih podataka, od kojih zavisi kvalitet i tačnost izlaznih rezultata procene, pre svega podataka koji se odnose na fizičko–hemijska svojstva gasa (materije koja se transportuje) i eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila–nadgradnji. Važno je istaći da je model razvijen na osnovu početnih ciljeva i motiva ovog istraživanja, a koji se odnose na unapređenje procesa transporta prirodnog gasa u Republici Srbiji sa naglaskom na fleksibilnost transporta i funkcionalnu primenljivost tehnologija, pre svega po pitanju unapređenja efikasnosti transporta.

7. Zaključak

U disertaciji razmatra se problematika drumskog transporta prirodnog gasa u komprimovanom stanju, zasnovana na specifičnostima koje prate transport gasova, poput regulatornih zahteva koje se odnose na materijale izrade nadgradnji–posuda pod pritiskom, zahteva koji se odnose na vozila i pogonska goriva, kao i specifičnosti fizičko–hemijskih karakteristika gasa, opasne materije koja se transportuje. Istraživanje se fokusira na razvoj modela za analizu parametra potrošnje goriva, izduvne emisije i njenih troškova, masenih iskorišćenja, transportovanih količina gasa i potrebnih zapreminskih kapaciteta u odnosu na zahtevane količine gasa. Pored navedenog, svrha istraživanja i razvoja modela jeste doprinos razvoju sveobuhvatne metodologije za izbor vozila i nadgradnji namenjenih transportu gasova. Ključni doprinosi disertacije naučnoj oblasti ogledaju se u razvoju i testiranju tri modela, koji mogu doprineti postupcima izbora vozila i nadgradnji namenjenih za skladištenje i transport prirodnog gasa, kao i planiranju i organizaciji postojećih voznih kapaciteta.

Prvi model predstavlja podršku u postupcima izbora vozila i nadgradnji sa aspekta procene potrošnje goriva u odnosu na eksploatacionu brzinu vozila, i temelji se na metodama procene potrošnje goriva zasnovanim na pogonskim karakteristikama motora. Svrha integracije metoda zasnovanih na pogonskim karakteristikama motora je što realnija analiza parametara koji potiču od eksploataciono–tehničkih karakteristika motora razmatranih vozila sa otporima koji se javljaju pri kretanju na različitim deonicama trase. Kao takav, razvijeni model predstavlja sveobuhvatan pristup ka proceni potrošnje, uzimajući u obzir širok spektar ulaznih parametara koji potiču od operativnih uslova eksploatacije i eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji. Razlog postavke modela da se određivanje potrošnje goriva vrši u odnosu na eksploatacionu brzinu vozila je u smanjenju složenosti modela, odnosno da se izbegnu zasebne analize promene režima kretanja za svaku tačku deonice. S druge strana, primenom regresione analize utvrđena je funkcionalna zavisnost potrošnje goriva od eksploatacione brzine vozila na deonici trase. Ostvareni rezultati prikazuju da potrošnja goriva određena modelom u poređenju sa srednjim vrednostima potrošnje dobijene putnim merenjem u proseku odstupa relativnom greškom oko 5%. Takođe, važno je istaći osetljivost modela na promenu uslova eksploatacije vozila i tehnologije transporta prirodnog gasa, odnosno generacijskih unapređenja tehničkih karakteristika posuda pod pritiskom. Razvijeni model testiran je u Republici Srbiji u preduzeću čija je osnovna delatnost transport gasova, a rezultati njihove primene objavljeni su u vodećem međunarodnim časopisu. Naučni doprinos modela, u odnosu na prethodna istraživanja, ogleda se u specifičnostima koje prate drumski transport gasa, kao i njihovim uticajima na promenu otpora pri kretanju vozila i potrošnju goriva. Na osnovu prethodno navedenog i rezultata ostvarenih u istraživanja, može se zaključiti da su postavljene hipoteze i ciljevi disertacije potvrđeni. Naime, razvojem modela za procenu potrošnje goriva može se unaprediti efikasnost drumskog transporta gasa i doprineti odlukama o izboru optimalnog vozila i nadgradnje za skladištenje i transport prirodnog gasa, boljoj organizaciji postojećih voznih kapaciteta, kao i redukciji negativnih uticaja na životnu sredinu.

Drugi model, takođe, predstavlja podršku u postupcima izbora vozila i nadgradnji, ali sa aspekta procene uticaja primene različitih vrsta goriva i tipova nadgradnji namenjenih za skladištenje i transport prirodnog gasa na zdravlje ljudi i životnu sredinu. Model se temelji na podacima o potrošnji goriva na osnovu koji se vrši procena izduvne emisije i njenih troškova na trasi, odnosno njenim deonicama. Osnovni razlog postavke modela na osnovu potrošnje goriva je mogućnost integracija metoda zasnovanih na pogonskim karakteristikama motora, kao u slučaju prvog modela, ili primenom direktnih podataka o utrošenoj količini goriva,

utvrđenih putnim merenjima. Kvantifikacija negativnih uticaja izduvne emisije na zdravlje ljudi i životnu sredinu, sprovodi se primenom jediničnih troškova zagađivača. Kao ključni doprinosi modela u odnosu na prethodna istraživanja izdvajaju se specifičnosti drumskog transporta gasa, prvenstveno uticaji generacijskih unapređenja tehničkih karakteristika posuda pod pritiskom, na promenu izduvne emisije i njene troškove. Ostvareni rezultati prikazuju visoku osetljivost modela na promenu uslova eksploatacije vozila, generacijska unapređenja tehničkih karakteristika posuda pod pritiskom, vrstu goriva i primenjenu tehnologiju tretmana izduvnih gasova. Rezultati razvijenog modela objavljeni su u vodećem međunarodnom časopisu. Polazeći od prethodno navedenog i rezultata dobijenih istraživanjem, može se zaključiti da su postavljene hipoteze i ciljevi disertacije potvrđeni. Razvojem modela za procenu izduvne emisije i njenih troškova može se unaprediti efikasnost drumskog transporta gasa i doprineti odlukama o izboru optimalnog vozila i nadgradnje za skladištenje i transport prirodnog gasa, redukciji emisije izduvnih gasova i negativnih uticaja na životnu sredinu.

Treći model predstavlja podršku u postupcima izbora vozila i nadgradnji sa aspekta boljeg iskorišćenja nadgradnji. Kao takav predstavlja sveobuhvatan pristup proceni transportovanih količina gasa po vozilu–nadgradnji, masenih iskorišćenja i potrebnih zapreminskih kapaciteta u zavisnosti od raspoloživih voznih kapaciteta i zahtevanih količina gasa. Razvijeni model zasnovan je na jednačinu stanja realnog gasa i faktoru kompresibilnosti. Postavka modela temelji se na integraciji fizičko–hemijskih svojstava gasa, eksploataciono–tehničkih karakteristika vozila i nadgradnji, transportnih i klimatskih uslova eksploatacije u jednačinu stanja realnog gasa. Kao naučni doprinos modela, u odnosu na prethodna istraživanja, izdvaja se razvoj jedinstvenog modela za procenu količine gasa po vozilu–nadgradnji, masenih iskorišćenja i potrebnih zapreminskih kapaciteta za realizaciju određenog transportnog zadatka. Ostvareni rezultati prokazuju visoku osetljivost modela na promenu fizičko–hemijskih svojstava gasa, generacijska unapređenja tehničkih karakteristika posuda pod pritiskom i vrednosti faktora kompresibilnosti gasa koji se transportuje. Model je testiran u Republici Srbiji u preduzeću čija je osnovna delatnost transport gasova. Sagledavanjem prethodno navedenog i rezultata dobijenih u okviru opisanog modela, izvedeni su zaključci da su postavljene hipoteze potvrđene. Razvojem modela za procenu transportovanih količina gasa, masenih iskorišćenja i potrebnih zapreminskih kapaciteta, može se unaprediti efikasnost drumskog transporta gasa i doprineti odlukama o izboru optimalnog vozila i nadgradnje, kao i doprineti boljoj organizaciji postojećih voznih kapaciteta i redukciji emisije izduvnih gasova. Sa aspekta naučne vrednosti i praktične primene disertacije, izdvajaju se i doprinosi koji se odnose na smernice prilikom izbora vrste pogonskih goriva u zavisnosti od oznake vozila prema nameni, kao i smernice za izbor nadgradnji, zasnovane na kodnoj oznaci nadgradnje i generacijskim unapređenjima tehničkih karakteristika posuda pod pritiskom. Pored navedenog, izdvajaju se i smernice prilikom izbora optimalnog vozila–nadgradnje u zavisnosti od tipa ležišta, odnosno fizičko–hemijskih svojstava gasa koji se transportuje.

Prethodno opisane mogućnosti i rezultati razvijenih modela doprinose planiranju i organizaciji postojećih voznih kapaciteta, ali mogu i značajno doprineti postupcima izbora novih vozila i nadgradnji. U skladu sa navedenim, ali i pravcima razvoja energetskog sektora Republike Srbije, pravci budućih istraživanja biće usmereni ka primeni polimernih i kompozitnih materijala u privredi i drumskom transportu robe, sa posebnim osvrtom na drumski transport opasne robe. Istraživanja će biti zasnovana na ispitivanjima mehaničkih i drugih fizičkih karakteristika polimernih i kompozitnih materijala, kao doprinos razvoju privrede i drumskog transporta robe, prvenstveno u svrhu unapređenja efikasnosti procesa transporta uz istovremeno ublažavanje negativnih uticaja na životnu sredinu.

8. Literatura

1. International Energy Agency. (IEA, 2023). Medium-Term Gas Report 2023. https://www.iea.org/reports/
2. Ministarstvo rudarstva i energetike. Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2040. Godine, sa projekcijama do 2050. godine, https://www.mre.gov.rs/
3. Speight, J. G. (2018). Natural gas: a basic handbook (Eds. 2), Gulf professional publishing, Houston, Texas, USA. https://doi.org/10.1016/C2015-0-02190-6
4. Deng, G., Chen, Y., Jia, G., Gao, Z., and Bo, K. (2018). Comparison of Wall-Temperatures of Two Types of Large Capacity Cylinders for Tube Trailers During CNG Loading Processes. *In Pressure Vessels and Piping Conference*, Prague, Czech Republic. https://doi.org/10.1115/PVP2018-84743
5. Reddi, K., Elgowainy, A., Rustagi, N., and Gupta, E. (2018a). Two-tier pressure consolidation operation method for hydrogen refueling station cost reduction. *International journal of hydrogen energy, 43(5)*, 2919-2929, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.125
6. Buschmann, T., and Gallep, J. (2024). Mobile Cross-Modal Infrastructure for the Supply of Electricity and Hydrogen. *Climate Crisis and Resilient Transportation Systems Conference on Sustainable Mobility CSUM 2024.* Plastira's Lake, Greece. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82818-8_45
7. Mićić, R. (2020). Tehnika i tehnologija proizvodnje gasa: Industrijsko inženjerstvo u eksploataciji nafte i gasa. Tehnički fakultet Mihajlo Pupin., Zrenjanin, Republika Srbija. str. 229.
8. Economic Commission for Europe Inland Transport Committee. European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ECE/TRANS/326 and ECE/TRANS/352 Volumes I and II). United Nations. 2025. https://unece.org/transport/dangerous-goods/adr-2025
9. Barth, M., Younglove, T., and Scora, G. (2005). Development of a heavy-duty diesel modal emissions and fuel consumption model. *California Partners for Advanced Transportation Technology*, UC Berkeley. https://escholarship.org/uc/item/67f0v3zf
10. Edwardes, W., and Rakha, H. (2014). Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model: modeling diesel and hybrid buses. *Transportation Research Record, 2428(1)*, 1-9. https://doi.org/10.3141/2428-01
11. Dindarloo, S. R., and Siami-Irdemoosa, E. (2016). Determinants of fuel consumption in mining trucks. *Energy, 112*, 232-240. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.085
12. Perrotta, F., Parry, T., and Neves, L. C. (2017). Application of machine learning for fuel consumption modelling of trucks. *In 2017 IEEE International Conference on Big Data, 3810-3815*, Boston (MA), USA. https://doi.org/10.1109/bigdata.2017.8258382
13. Ivković, I. S., Kaplanović, S. M., i Milovanović, B. M. (2017b). Influence of road and traffic conditions on fuel consumption and fuel cost for different bus technologies. *Thermal Science, 21 (1 Part B)*, 693-706. https://doiserbia.nb.rs/Article.aspx?id=0354-98361600135I
14. Ivković, I., Čokorilo, O., Kaplanović, S. (2018). The estimation of GHG emission costs in road and air transport sector: Case study of Serbia. *Transport, 33(1),* 260-267. https://doi.org/10.3846/16484142.2016.1169557
15. Ivković, I., Kaplanović, S., Sekulić, D. (2019). Analysis of external costs of CO2 emissions for cng buses in intercity bus service. *Transport, 34(5),* 526-538. https://doi.org/10.3846/transport.2019.11473
16. Fang, C., Song, S., Chen, Z., and Gui, A. (2019, November). Fine-grained fuel consumption prediction. *In Proceedings of the 28th ACM International Conference on Information and Knowledge Management*, 2783-2791, Beijing China. https://doi.org/10.1145/3357384.3357836
17. Kan, Y., Liu, H., Lu, X., and Chen, Q. (2020, September). A deep learning engine power model for estimating the fuel consumption of heavy-duty trucks. *In 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon), 182-187*, Gammarth, Tunisia. https://doi.org/10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236554

18. Pereira, G., Parente, M., Moutinho, J., and Sampaio, M. (2021). Fuel consumption prediction for construction trucks: A noninvasive approach using dedicated sensors and machine learning. *Infrastructures, 6(11),* 157. https://doi.org/10.3390/infrastructures6110157
19. Katreddi, S., and Thiruvengadam, A. (2021). Trip based modeling of fuel consumption in modern heavy-duty vehicles using artificial intelligence. *Energies, 14(24),* 8592. https://doi.org/10.3390/en14248592
20. Gong, J., Shang, J., Li, L., Zhang, C., He, J., and Ma, J. (2021). A comparative study on fuel consumption prediction methods of heavy-duty diesel trucks considering 21 influencing factors. *Energies, 14(23),* 8106. https://doi.org/10.3390/en14238106
21. Alamdari, S., Basiri, M. H., Mousavi, A., and Soofastaei, A. (2022). Application of machine learning techniques to predict haul truck fuel consumption in open-pit mines. *Journal of Mining and Environment, 13(1),* 69-85. https://doi.org/10.22044/jme.2022.11577.2145
22. Peng, C., Wang, Y., Xu, T., and Chen, Y. (2023). Transient fuel consumption prediction for heavy-duty trucks using on-road measurements. International *Journal of Sustainable Transportation, 17(8),* 956-967. https://doi.org/10.1080/15568318.2022.2130842
23. Čokorilo, O., Ivković, I., and Kaplanović, S. (2019). Prediction of exhaust emission costs in air and road transportation. *Sustainability, 11(17),* 4688. https://doi.org/10.3390/su11174688
24. Weller, K., Lipp, S., Röck, M., Matzer, C., Bittermann, A., and Hausberger, S. (2019). Real World Fuel Consumption and Emissions From LDVs and HDVs. *Frontiers in Mechanical Engineering, 5*. https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00045
25. Ziółkowski, A., Fuć, P., Jagielski, A., and Bednarek, M. (2022). Analysis of emissions and fuel consumption in freight transport. *Energies, 15(13),* 4706. https://doi.org/10.3390/en15134706
26. Lei, J.; Yang, C.; Fu, Q.; Chao, Y.; Dai, J.; Yuan, Q. (2024). An approach of localizing MOVES to estimate emission factors of trucks. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 229–242. https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2023.02.002
27. Chen, H., Zheng, J., Xu, P., Li, L., Liu, Y., and Bie, H. (2010). Study on real-gas equations of high pressure hydrogen. *International journal of hydrogen energy, 35(7),* 3100-3104, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.029
28. Elgowainy, A., Reddi, K., Sutherland, E., and Joseck, F. (2014). Tube-trailer consolidation strategy for reducing hydrogen refueling station costs. *International journal of hydrogen energy, 39(35),* 20197-20206. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.10.030
29. Zheng, J., Zhang, X., Xu, P., Gu, C., Wu, B., and Hou, Y. (2016). Standardized equation for hydrogen gas compressibility factor for fuel consumption applications. *International journal of hydrogen energy, 41(15),* 6610-6617. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.004
30. Reddi, K., Elgowainy, A., Rustagi, N., and Gupta, E. (2018b). Techno-economic analysis of conventional and advanced high-pressure tube trailer configurations for compressed hydrogen gas transportation and refueling. *International journal of hydrogen energy, 43(9),* 4428-4438. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.049
31. Mair, G. W., Thomas, S., Schalau, B., and Wang, B. (2021). Safety criteria for the transport of hydrogen in permanently mounted composite pressure vessels. *International journal of hydrogen energy, 46(23),* 12577-12593. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.268
32. Solazzi, L., and Vaccari, M. (2022). Reliability design of a pressure vessel made of composite materials. *Composite structures, 279,* 114726. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114726
33. Azeem, M., Ya, H. H., Alam, M. A., Kumar, M., Stabla, P., Smolnicki, M. and Mustapha, M. (2022). Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review. *Journal of Energy Storage, 49,* 103468. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468
34. Fleischhacker, N., Shakibi Nia, N., Coll, M., Perwög, E., Schreiner, H., Burger, A., and Fleischhacker, E. (2023). Establishment of Austria's first regional green hydrogen economy: WIVA P and G HyWest. *Energies, 16(9),* 3619. https://doi.org/10.3390/en16093619
35. Meng, Z., Jin, S., Yu, M., Mehari, A., and Jiang, L. (2024). Analysis of the Boss Structure of Type IV Composite Vessel for a High-Pressure Hydrogen Tube Trailer. *Sustainability, 16(12),* 5098. https://doi.org/10.3390/su16125098

36. Bilgili, M., and Yumşakdemir, R. F. (2024). Effects of real gas equations on the fast-filling process of compressed hydrogen storage tank. *International Journal of Hydrogen Energy, 53*, 816-828. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.028
37. Wang, X., Xu, Y., Wang, S., Xu, Q., and Ho, T. C. (2020). Comprehensive study on boil-off gas generation from LNG road tankers under simultaneous impacts of heat leakage and transportation vibration. *Fuel, 275*, 117876. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117876
38. Maltby, T. W., Aasen, A., Hammer, M., and Wilhelmsen, Ø. (2025). Review of Experimental Data and Evaluation of Equations of State for Modeling Formation of Solid CO2 in CCS and Natural Gas Applications. *Industrial and Engineering Chemistry Research, 64(50)*, 24253-24263. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.5c04028
39. Shin, H. K., and Ha, S. K. (2024). Techno-economic analysis of type III and IV composite hydrogen storage tanks for fuel cell vehicles. *Advanced Composite Materials, 33(4)*, 527-559. https://doi.org/10.1080/09243046.2023.2278258
40. LibreTexts. (n.d.). Home. Dostupno na: https://chem.libretexts.org/ (Pristupano 27.07.2025.)
41. IMT Design. (n.d.). Home. Dostupno na: https://imt.design/en/ (Pristupano 27.07.2025.)
42. CTIF – International Association of Fire and Rescue Services. Dostupno na: https://ctif.org/ (Pristupano 27.07.2025.)
43. Owner Team Consult. (n.d.). Dostupno na: https://www.ownerteamconsult.com/ (Pristupano 27.07.2025.)
44. State of Arkansas. Official government portal. Dostupno na: https://portal.arkansas.gov/ (Pristupano 27.07.2025.)
45. SQLearn e-Learning. Home. Dostupno na: https://www.sqlearn.com/ (Pristupano 27.07.2025.)
46. Maritime Training Academy. Home. Dostupno na: https://maritimetrainingacademy.com/ (Pristupano 27.07.2025.)
47. Bulgarian Maritime Training Centre. Home. Dostupno na: https://bmtc.bg/en/ (Pristupano 27.07.2025.)
48. Van Heerden, F., and Putter, A. (2021). Alternative Modes of Natural Gas Transport. https://polairetech.com/wp-content/uploads/2023/12/Insight-Article-083-Alternative-Modes-of-Natural-Gas-Transport.pdf
49. Kidnay, A. J., Parrish, W. R., and McCartney, D. G. (2019). *Fundamentals of natural gas processing*. CRC press. pp 472. https://www.taylorfrancis.com/books/
50. Kunz, O., and Wagner, W. (2012). The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: An expansion of GERG-2004. *Journal of chemical and engineering data, 57(11)*, 3032-3091. https://doi.org/10.1021/je300655b
51. Shirazi, L., Sarmad, M., Rostami, R. M., Moein, P., Zare, M., and Mohammadbeigy, K. (2019). Feasibility study of the small scale LNG plant infrastructure for gas supply in north of Iran (Case Study). *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 35*, 220-229. https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.07.010
52. Directive 2008/68/EC of the European Parliament and of the Council of 24 September 2008 on the inland transport of dangerous goods (Text with EEA relevance). http://data.europa.eu/eli/dir/2008/68/oj
53. Directive 2022/1999/EU of the European Parliament and of the Council of 19 October 2022 on uniform procedures for checks on the transport of dangerous goods by road. http://data.europa.eu/eli/dir/2022/1999/oj
54. Directive 2010/35/EU of the European Parliament and of the Council of 16 June 2010 on transportable pressure equipment and repealing Council Directives 76/767/EEC, 84/525/EEC, 84/526/EEC, 84/527/EEC and 1999/36/EC. http://data.europa.eu/eli/dir/2010/35/oj
55. Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council of 5 September 2007. http://data.europa.eu/eli/dir/2007/46/oj
56. Regulation 2018/858/EU of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018. http://data.europa.eu/eli/reg/2018/858/oj
57. Regulation No 3 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE)– Uniform provisions concerning the approval of retro-reflecting devices for power-driven vehicles and their trailers. http://data.europa.eu/eli/reg/2011/3(2)/oj

58. Regulation No 10 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE)– Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to electromagnetic compatibility. http://data.europa.eu/eli/reg/2012/10/oj
59. Regulation No 13 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE)– Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking. https://unece.org/transport/documents/2023/10/working-documents/regulation-no-13
60. Regulation No 29 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE)– Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle. http://data.europa.eu/eli/reg/2010/29(2)/oj
61. Regulation No 89 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE)– Vehicles with regard to limitation of their maximum speed or their adjustable speed limitation function. https://unece.org/transport/vehicle-regulations
62. Regulation No 105 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) –Uniform provisions concerning the approval of vehicles intended for the carriage of dangerous goods. https://unece.org/transport/vehicle-regulations
63. Regulation No 110 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) –Specific components of motor vehicles using compressed natural gas (CNG) and/or liquefied natural gas (LNG) in their propulsion system. https://unece.org/transport/vehicle-regulations
64. ISO 9809: 2019. Gas cylinders–Design, construction and testing of refillable seamless steel gas cylinders and tubes. https://www.iso.org/standard
65. ISO 7866: 2012. Gas cylinders–Refillable seamless aluminium alloy gas cylinders–Design, construction and testing. https://www.iso.org/standard
66. ISO 11120: 2015. Gas cylinders – Refillable seamless steel tubes of water capacity between 150 l and 3000 l–Design, construction and testing. https://www.iso.org/standard
67. EN 13807: 2017. Transportable gas cylinders - Battery vehicles and multiple-element gas containers (MEGCs)–Design, manufacture, identification and testing. https://www.en-standard.eu/
68. ISO 11119-3: 2020. Gas cylinders–Design, construction and testing of refillable composite gas cylinders and tubes. https://www.iso.org/standard
69. ISO 11515: 2022. Gas cylinders–Refillable composite reinforced tubes of water capacity between 450 l and 3000 l–Design, construction and testing. https://www.iso.org/standard
70. EN 12257: 2002. Transportable gas cylinders - Seamless, hoop-wrapped composite cylinders. https://www.en-standard.eu/
71. ISO 11114-1: 2020. Gas cylinders–Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents. https://www.iso.org/standard
72. Luxfer CNG Mobility Applications. https://www.luxfercylinders.com;
73. EKC UAE. CASCADES MEGC. https://www.ekcuae.com/products/;
74. PFC. homepage. https://pfc.hr/;
75. Gaznet Ltd. H2 and CNG MEGC containers. https://megccng.com/;
76. Additive Manufacturing for Lightweight Structural Components. https://www.addcomposites.com/;
77. Hexagon Composites ASA. https://hexagongroup.com/markets/gas-distribution;
78. City Machine and Welding, Inc. https://cmwelding.com/products;
79. Koyuncu Gas and Gas Equipment. https://www.koyuncutas.com/en/product/;
80. Faber Industrie SPA. https://faber-italy.com/;
81. FIBA Technologies, Inc. https://www.fibatech.com/products/
82. Agne, L. L., Almeida Jr, J. H. S., Maruyama, M. H., de Souza, D. T., Amico, S. C., and Tonatto, M. L. (2025). Progressive failure modelling of Type IV composite overwrapped pressure vessels for compressed natural gas (CNG) storage. *Composite Structures*, *370*, 119424. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.119424
83. Sharma, P., Chugh, P., and Neogi, S. (2021). Study to methodize the design of a safe Type-4 CNG storage vessel using finite element analysis with experimental validation. *International*

Journal of Pressure Vessels and Piping, 192, 104425. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104425
84. Jeon, B., and Park, C. (2025). Failure analysis of in-service Type-II CNG cylinders from composite part damaged by hexagon flange bolt. Engineering Failure Analysis, 180, 109842. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109842
85. Mair, G. W. (2017). Safety assessment of composite cylinders for gas storage by statistical methods. Cham, Switzerland: Springer International. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49710-5
86. Lasn, K., and Echtermeyer, A. T. (2014). Safety approach for composite pressure vessels for road transport of hydrogen. Part 1: Acceptable probability of failure and hydrogen mass. *International Journal of Hydrogen Energy*, *39*(26), 14132-14141. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.116
87. Azuma, M., Oimatsu, K., Oyama, S., Kamiya, S., Igashira, K., Takemura, T., and Takai, Y. (2014). Safety design of compressed hydrogen trailers with composite cylinders. *International Journal of Hydrogen Energy*, *39*(35), 20420-20425. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.147
88. Tomić, M., i Petrović., S. (2000). *Motori sa unutrašnjim sagorevanjem*. Mašinski fakultet u Beogradu, Beograd. str. 388.
89. Popović, S., i Miljić., N. (2018). *Motori Sus – Praktikum*. Mašinski fakultet u Beogradu, Beograd. str. 140.
90. Milivojević, A. (2023). *Fizika sagorevanja*. Mašinski fakultet u Beogradu, Beograd. str. 178.
91. Philp, R. P. (2020). *Composition and properties of petroleum. In Hydrocarbons, Oils and Lipids: Diversity, Origin, Chemistry and Fate.* Cham: Springer International Publishing. pp. 269-310. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90569-3_13
92. Martínez, I. (2025). Fuels, fuel properties, fuel consumption, and pyrotechnics. Dostupno na: http://imartinez.etsiae.upm.es/ (Pristupano 27.07.2025.)
93. Mitrović, L. (2024). *Analiza toplotne moći i Vobeovog indeksa prirodnog gasa različitog porekla*. Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, str. 81.
94. Bae, Y., Rindt, C. R., Mitra, S. K., and Ritchie, S. G. (2024). Fleet operator perspectives on alternative fuels for heavy-duty vehicles. *Transport Policy, 149*, 36-48. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.01.023
95. Bae, Y., Mitra, S. K., Rindt, C. R., and Ritchie, S. G. (2022). Factors influencing alternative fuel adoption decisions in heavy-duty vehicle fleets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 102*, 103150. https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103150
96. Procurement Resource. (PR, 2025). Gasoline and Diesel Production Cost Proceses With Cost Analysis Report 2025. Dostupno na: https://www.procurementresource.com(Pristupano 28.06.2025.)
97. Nylund, S., and Wenstedt, N. (2019). WELL-TO-WHEELS ANALYSIS OF HEAVY-DUTY TRUCK FUELS: A comparison between LNG, LBG and Diesel. https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1324115/FULLTEXT01.pdf
98. Van Grinsven, A., Otten, M., van Den Toorn, E., van Der Veen, R., Király, J., and Van den Berg, R. (2021). Alternative fuel infrastructures for heavy-duty vehicles. European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690901/IPOL_STU(2021)690901_EN.pdf;
99. Rakić, S. (2008). Analiza primene tečnog naftnog gasa kao pogonskog energenta motora SUS. Vojnotehnički glasnik, 56(1), 90-107. https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0042-8450/2008/0042-84500801074R.pdf
100. Ivković, I. (2020). *Motorna vozila*. Beograd: Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, str. 445.
101. Del Pozo, C. A., Cloete, S., and Álvaro, Á. J. (2022). Techno-economic assessment of long-term methanol production from natural gas and renewables. *Energy Conversion and Management, 266*, 115785. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115785

102. Facts Global Energy (FGE, 2024). Long-Term Price and Dynamics for LPG Markets. MECS Report. https://mecs.org.uk/publications/long-term-price-and-dynamics-for-lpg-markets/
103. U.S. Energy Information Administration (EIA, 2025). Short-Term Energy Outlook: Natural Gas. https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/natgas.php
104. Brecher, A., Epstein, A. K., and Breck, A. (2015). Review and analysis of potential safety impacts of and regulatory barriers to fuel efficiency technologies and alternative fuels in medium-and heavy-duty vehicles. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/12207
105. Lof, J., MacKinnon, C., Martin, G., and Layzell, D. B. (2020). Survey of Heavy-Duty Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. Technical report, The Transition Accelerator. https://transitionaccelerator.ca/wp-content/uploads/2020/07/HFCE-vehicles-scenario-r2-1.pdf
106. Noto, F., and Mostofi, H. (2023). Acceptance Analysis of Electric Heavy Trucks and Battery Swapping Stations in the German Market. *Systems, 11(9)*, 441. https://doi.org/10.3390/systems11090441
107. Yüksel, F., and Yüksel, B. (2004). The use of ethanol–gasoline blend as a fuel in an SI engine. *Renewable energy, 29(7)*, 1181-1191. https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.11.012
108. Jegan, T. C., Chitra, R., and Glivin, G. (2021). Testing of ethanol as an alternative fuel for IC engine. *Energy Research Journal*, *12*, 13-21. https://doi.org/10.3844/erjsp.2021.13.21
109. Aui, A., Wang, Y., amd Mba-Wright, M. (2021). Evaluating the economic feasibility of cellulosic ethanol: A meta-analysis of techno-economic analysis studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *145*, 111098. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111098
110. Pratschner, S., Radosits, F., Ajanovic, A., and Winter, F. (2023). Techno-economic assessment of a power-to-green methanol plant. *Journal of CO2 Utilization*, *75*, 102563. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102563
111. Hoey, M., Clark, R., Webb, E., and Lynd, L. (2025). Scale sensitivity of ethanol production via consolidated bioprocessing with consideration of feedstock cost. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 19(1)*, 9-17. https://doi.org/10.1002/bbb.2691
112. Todorović, J. (2004). Vodonik-energent budućnosti. *Vojnotehnički glasnik, 52(5)*, 484-496. https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0042-8469/2004/0042-84690405484T.pdf
113. Konjević, M. (2005). Vodonik kao energetski vektor budućnosti-hidridi i baterije na vodonik. *Vojnotehnički glasnik, 53(5)*, 461-471. https://www.redalyc.org/pdf/6617/661770122007.pdf
114. Farias, C. B. B., Barreiros, R. C. S., da Silva, M. F., Casazza, A. A., Converti, A., and Sarubbo, L. A. (2022). Use of hydrogen as fuel: a trend of the 21st century. *Energies, 15(1)*, 311. https://doi.org/10.3390/en15010311
115. Simanullang, M. (2025). Liquid hydrogen storage and insulation materials for liquid hydrogen storage tanks: Trends and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy, 140*, 881-888. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.453
116. International Energy Agency. (IEA, 2021). Global hydrogen review 2021: Executive summary. IEA. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021/executive-summary
117. Huang, Y., Surawski, N. C., Organ, B., Zhou, J. L., Tang, O. H., and Chan, E. F. (2019). Fuel consumption and emissions performance under real driving: Comparison between hybrid and conventional vehicles. *Science of the Total Environment, 659*, 275-282. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.349
118. Mordor Intelligence. (2020). Hybrid heavy duty vehicle market: Global industry analysis and forecast (2021–2027) by technology, hybrid type, vehicle type, power train type, propulsion type, and region. https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/hybrid-vehicle-market
119. De las Nieves Camacho, M., Jurburg, D., and Tanco, M. (2022). Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics. *International Journal of Hydrogen Energy, 47(68)*, 29505-29525. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.271
120. Vehicles on european roads, 2025: https://www.acea.auto/files/ACEA-Report-Vehicles-on-European-roads-.pdf;
121. U.S. government road vehicle fleet, 2023: https://www.statista.com;
122. Road vehicle fleet by vehicle category and fuel type, 2025: https://w3.unece.org/;

123. Heavy-duty vehicles in China, 2025: https://wwwen.ipe.org.cn/ICCT/HeavyDutyVehicle.aspx;
124. Republički zavod za statistiku Srbije, 2025: https://www.stat.gov.rs/sr-latn/oblasti/saobracaj-i-telekomunikacije/registrovana-vozila/;
125. Regulation No 34 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles. Uniform provisons concerning the approval of tanks for liquid fuel and of vehicles with regard to the prevention of fire risks. https://unece.org/transport/vehicle-regulations
126. Regulation No 134 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles. Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard
127. to the safety-related performance of hydrogen-fuelled vehicles (HFCV). https://unece.org/transport/vehicle-regulations
128. Regulation No GT 13 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE). Global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles. https://unece.org/transport/vehicle-regulations
129. Regulation No GT 20 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE). Global Technical Regulation on the Electric Vehicle Safety (EVS). https://unece.org/transport/vehicle-regulations
130. Regulation No 100 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train. https://unece.org/transport/vehicle-regulations
131. Ministarstvo unutrašnje i spoljne trgovine, javna baza benzinskih stanica u Srbji, 2025: https://must.gov.rs/tekst/384/javna-baza-benziskih-stanica-u-srbiji.php;
132. Javno preduzeće putevi Srbije, elektropunjači, 2025: https://www.putevi-srbije.rs/index.php/en/electric-chargers;
133. NIS Petrol i Gazprom benzinske stanice, 2025: https://www.nisgazprom.rs;
134. Elektroprivreda Srbije, 2025: https://www.eps.rs/lat/snabdevanje/Stranice/cene.aspx;
135. ACEA, Heavy-duty vehicles, Charging and refuelling infrastructure requirements, 2021: https://www.acea.auto/publication/position-paper-heavy-duty-vehicles-charging-and-refuelling-infrastructure-requirements/;
136. European Commission, Alternative Fuels Observatory, 2025: https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27/infrastructure
137. U.S Department of Energy, Alternative Fueling Station Locator, 2025: https://afdc.energy.gov/stations#/find/nearest;
138. U.S Department of Energy, Average Retail Fuel Prices in the United States, 2025: https://afdc.energy.gov/data/10326;
139. ICCT, Zero-Emission Medium-And Heavy-Duty Vehicle Market In China, 2024: https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/11/ID-247-%E2%80%93-China-ZEMHDVs_spotlight_final-1.pdf;
140. IEEFA, Heavy trucking unlikely to materially increase China's LNG imports, 2024: https://ieefa.org/resources/heavy-trucking-unlikely-materially-increase-chinas-lng-imports;
141. China Fuel Cards Market Size, Share, Key Players, Competitor Card Analysis and Forecast to 2028, 2024: https://www.globaldata.com/store/report/china-fuel-cards-market-analysis/;
142. Real-world performance of battery electric heavy-duty vehicles in China, 2023: https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/04/HDV-BEVs-real-world_final2.pdf;
143. Public charging requirements for battery electric long-haul trucks in Europe: a trip chain approach, 2023: https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/bd314b3f-f21a-4e73-bd32-48ff6a8d022a/content;

144. Alternative fuel infrastructures for heavy-duty vehicles, 2021: https://bit.ly/3o58pmI;
145. Test report of Iveco LNG-powered HD-truck, 2017: https://www.iveco.com/poland/-/media/Iveco---Press-Import/poland/Pdfs/20171110_Raport-LNG_Unilever_Link_Iveco_Cryogas.pdf?rev=-1;
146. NSC, Fuel consumption limits for heavy-duty commercial vehicles, 2019: https://theicct.org/sites/default/files/China%20Stage%203%20Standards%20%28GB30510-2018%29.pdf;
147. CTL, Outlook Hinterland and Continental Freight, 2020: https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/CE_Delft_190112_Outlook-Hinterland-Continental-Freight-2020.pdf;
148. Hyundai. XCIENT Fuel Cell Truck. Introducing the Class 8 Fuel Cell Electric Truck for North America. (2025): https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-tractor-fcev;
149. Wilson, S. (2023). Hydrogen-Powered Heavy-Duty Trucks. Union of Concerned Scientists, November, 4-5. https://doi.org/10.47923/2023.15274;
150. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2025). *Timeline of Major Accomplishments in Transportation, Air Pollution, and Climate Change*. (EPA, 2025). Dostupno na: https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change/timeline-major-accomplishments-transportation-air
151. CARB. California Air Resources Board. (2025). History. California Environmental Protection Agency. (CARB, 2025). Dostupno na: https://ww2.arb.ca.gov/about/history
152. PHINIA. (2024). *Worldwide Heavy-Duty And Off-Road Emission Standards, On-Road Heavy-Duty Vehicles And Engines, Off-Road/Non-Road Vehicles, Engines And Equipment. (*PHINIA, 2024). Dostupno na: https://www.phinia.com/docs/phinialibraries/central-document-hub/phinia-worldwide-emissions-standards-booklet.pdf?sfvrsn=17320b1d_12
153. Standardization Administration of China. (2019). *GB/T 38146.2-2019: China automotive test cycle – Part 2: Heavy-duty commercial vehicles (English version)*. (SAC, 2019). https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GBT38146.2-2019
154. Council Directive 88/77/EEC of 3 December 1987 on the approximation of the laws of the Member States relating to the measures to be taken against the emission of gaseous pollutants from diesel engines for use in vehicles. https://data.europa.eu/eli/dir/1988/77/oj (zamenjena 91/542/EEC)
155. Council Directive 91/542/EEC of 1 October 1991 amending Directive 88/77/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to the measures to be taken against the emission of gaseous pollutants from diesel vehicles. https://data.europa.eu/eli/dir/1991/542/oj (zamenjena 1999/96/EC)
156. Regulation No 49 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE)—Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression and positive-ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles. https://unece.org/transport/vehicle-regulations
157. European Parliament and Council of the European Union. (1999). Directive 1999/96/EC of 13 December 1999 on the approximation of the laws of the Member States. https://data.europa.eu/eli/dir/1999/96/oj (zamenjena 2005/55/EC)
158. Directive 2005/55/EC of the European Parliament and of the Council of 28 September 2005 on the approximation of the laws of the Member States. https://data.europa.eu/eli/dir/2005/55/oj (zamenjena 595/2009/EC)
159. Regulation (EC) No 595/2009/EC of 18 June 2009 on type-approval of motor vehicles and engines with respect to emissions from heavy duty vehicles (Euro VI) and on access to vehicle repair and maintenance information, and amending Regulation (EC) 715/2007 and Directives 2007/46/EC, 80/1269/EEC, 2005/55/EC and 2005/78/EC. https://data.europa.eu/eli/reg/2009/595/oj
160. Borg Warner (2021). *Worldwide Emission Standards, On and Off-Highway Commercial Vehicles*. Dostupno na: https://www.scribd.com/document/728941155/On-and-Off-highway-Commercial-Vehicles-Emissions-Standards-Booklet-2021-2022

161. Perujo, A. (2021). *Testing within Euro VI regulation*. 4th Sino-EU Workshop on New Emissions Standards and Regulations for Motor Vehicles, Joint Research Centre (JRC), European Commission. https://www.parlament.gv.at/dokument/XXVII/EU/119473/imfname_11191953.pdf
162. Regulation (EU) 2019/1242/EU of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 setting CO_2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending Regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2018/956 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC. https://data.europa.eu/eli/reg/2019/1242/oj
163. Regulation (EU) 2024/1257/EU of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 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). https://data.europa.eu/eli/reg/2024/1257/
164. Dornoff, J., and Rodríguez, F. (2024). Euro VII (7): The new emission standard for light-and heavy-duty vehicles in the European Union. *International Council on Clean Transportation*. https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/03/ID-116-%E2%80%93-Euro-7-standard_final.pdf
165. Guo, J., Ge, Y., Hao, L., Tan, J., Li, J., and Feng, X. (2014). On-road measurement of regulated pollutants from diesel and CNG buses with urea selective catalytic reduction systems. *Atmospheric environment, 99*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.032
166. Anderson, L. G. (2015). Effects of using renewable fuels on vehicle emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47*, 162-172. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.011
167. Quiros, D. C., Smith, J., Thiruvengadam, A., Huai, T., and Hu, S. (2017). Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport. *Atmospheric Environment, 168*, 36-45. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066
168. Quiros, D. C., Thiruvengadam, A., Pradhan, S., Besch, M., Thiruvengadam, P., Demirgok, B., ... and Hu, S. (2016). Real-world emissions from modern heavy-duty diesel, natural gas, and hybrid diesel trucks operating along major California freight corridors. *Emission Control Science and Technology, 2(3)*, 156-172. https://doi.org/10.1007/s40825-016-0044-0
169. Ivković, I. (2012). Istraživanje performansi autobusa sa pogonom na komprimovani prirodni gas sa stanovišta bezbednosti i uticaja na životnu sredinu. Beograd: Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, str. 292. https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/2665
170. Vaneman, G. L. (1991). Comparison of metal foil and ceramic monolith automotive catalytic converters. *In Studies in Surface Science and Catalysis. Elsevier, 71*, 537-545. https://doi.org/10.1016/s0167-2991(08)63000-1
171. Haaß, F., and Fuess, H. (2005). Structural characterization of automotive catalysts. *Advanced Engineering Materials, 7(10)*, 899-913. https://doi.org/10.1002/adem.200500120
172. Ianoşev, S., Lazău, I., Păcurariu, C., and Avramescu, A. (2008). Cordierite (2MgO 2Al2O3 5SiO2) synthesis by unconventional methods. *Processing and Application of Ceramics, 2(1)*, 39-44. https://doi.org/10.2298/PAC0801039I
173. Feriyanto, D., Pranoto, H., Carles, H., and Leman, A. M. (2020). Comparison of metallic (FeCrAl) and Ceramic Catalytic Converter (CATCO) in reducing exhaust gas emission of gasoline engine fuelled by RON 95 to develop health environment. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 485(1)*. IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/485/1/012004
174. Feßler, D. K. Modellbasierte On-Board-Diagnoseverfahren für Drei-Wege-Katalysatoren (Doctoral dissertation, Dissertation, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010). https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000020627
175. Eickenhorst, R., and Koch, T. (2023). An experimental study on aging effects of the air–fuel ratio swing on modern gasoline three-way catalysts. *Automotive and Engine Technology, 8(3)*, 177-192. https://doi.org/10.1007/s41104-023-00132-0

176. Bao, L., Wang, J., Shi, L., and Chen, H. (2022). Exhaust gas after-treatment systems for gasoline and diesel vehicles. *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*, 9-9. https://doi.org/10.53941/ijamm0101009
177. Lambert, C. K. (2019). Perspective on SCR NOx control for diesel vehicles. *Reaction Chemistry and Engineering, 4(6)*, 969-974. https://doi.org/10.1039/C8RE00284C
178. Rood, S., Eslava, S., Manigrasso, A., and Bannister, C. (2019). Recent advances in gasoline three-way catalyst formulation: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 234(4)*, 936-949. https://doi.org/10.1177/0954407019859822
179. Morgan, C. (2014). 40 Years of Cleaner Air: The evolution of the autocatalyst. *Johnson Matthey's international journal of research exploring science and technology in industrial applications*, 217. https://doi.org/10.1595/205651314X684726
180. Manojlović, A., Momčilović, V., Milović, M., Trifunović, J., Kaplanović, S., Milosavljević, I. (2019) Studija o proceni emisija zagađujućih materija u atmosferu od saobraćaja na državnim putevima I i II reda za period 2016-2018. godine, Intico d.o.o., Beograd. https://www.putevi-srbije.rs/
181. Todorović, J. (1979). *Ispitivanje motornih vozila*. Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu. str. 317.
182. Šilić, Đ. (2010). *Ispitivanje motornih vozila (Ed. I)*. Velika Gorica: Veleučilište Velika Gorica.
183. U.S. Environmental Protection Agency. (2020). Improvements for heavy-duty engine and vehicle test procedures, and other technical amendments: Final rule (EPA-420-F-20-051). Office of Transportation and Air Quality. https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/final-rule-improvementsheavy-duty-engine-and-vehicle
184. United Nations Economic Commission for Europe. (2021). Addendum 4: Global technical regulation No. 4 – Test procedure for compression ignition (C.I.) engines and positive-ignition (P.I.) engines fuelled with natural gas (NG) or liquefied petroleum gas (LPG) with regard to the emission of pollutants (WHTC). https://unece.org/sites/default/files/2025-05/ECE-TRANS-180a4am4e%20%282%29.pdf
185. Weller, K. (2020). Emission models for heavy duty vehicles based on on-road measurements. Graz University of Technology: https://cdn.prod.websitefiles.com/6207922a2acc01004530a67e/62175d4e097ca4f29fd4ef05_Phd_Thesis_KonstantinWeller.pdf
186. Mrđa, P. (2020). Povećanje efikasnosti ispitivanja motora SUS primenom dinamičkih metoda. Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu. str. 246. https://machinery.mas.bg.ac.rs/handle/123456789/6753?locale-attribute=sr_RS
187. Pavlovic, J., Fontaras, G., Broekaert, S., Ciuffo, B., Ktistakis, M. A., and Grigoratos, T. (2021). How accurately can we measure vehicle fuel consumption in real world operation?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 90*, 102666. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102666
188. Commission Regulation 582/2011/EC of the European Parliament and of the Council of of 25 May 2011 implementing and amending Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council with respect to emissions from heavy duty vehicles (Euro VI) and amending Annexes I and III to Directive 2007/46/EC. http://data.europa.eu/eli/reg/2011/582/oj
189. Regulation (EU) 2024/1610 of the European Parliament and of the Council of 14 May 2024 amending Regulation (EU) 2019/1242 as regards strengthening the CO_2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles and integrating reporting obligations, amending Regulation (EU) 2018/858 and repealing Regulation (EU) 2018/956. http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1610/oj
190. Commission Regulation (EU) 2017/2400 of 12 December 2017 implementing Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council as regards the determination of the CO_2 emissions and fuel consumption of heavy-duty vehicles and amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council and Commission Regulation (EU) No 582/2011. http://data.europa.eu/eli/reg/2017/2400/oj

191. Ragon, P. L., and Rodríguez, F. (2021). Avoiding a gap between certified and real-world CO_2 emissions: Technical considerations for on-board fuel consumption measurements in trucks. Working Paper, (2021-01). https://theicct.org/sites/default/files/publications/Onboard-fuel-consumption-trucks-012021.pdf
192. Commission Regulation (EU) 2018/1832 of 5 November 2018 amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) 2017/1151 for the purpose of improving the emission type approval tests and procedures for light passenger and commercial vehicles, including those for in-service conformity and real-driving emissions and introducing devices for monitoring the consumption of fuel and electric energy. http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1832/oj
193. Rexeis, M. (2021). Measuring the fuel consumption of light-and heavy-duty vehicles and monitoring their real-world fuel consumption. http://doi.org/10.2834/1348323
194. Scintex Engine Fuel Flow Meter and Consumption Kit. https://www.scintex.com.au
195. American Automobile Association. (2021). Accuracy of in-dash fuel estimates. NewsRoom.AAA.com. https://newsroom.aaa.com/wp-content/uploads/2021/07/E.1.-Accuracy-of-In-Dash-Fuel-Economy-Displays-Research-Report_FINAL.pdf
196. HORIBA. OBS-ONE GS: On-board emissions measurement system. Kyoto, Japan: HORIBA Ltd., https://www.horiba.com/int/mobility/products/detail/action/show/Product/obs-one-gs-unit-28/
197. Schäffer, F. (2021). *Dijagnoza vozila uz pomoć OBD II (drugo izdanje)*. Agencija Eho. (Originalno delo objavljeno na nemačkom jeziku pod naslovom Fahrzeugdiagnose mit OBD II) ISBN: 978-86-80134-32-1
198. Krstić, B. (2009). *Tehnička eksploatacija motornih vozila i motora*. Kragujevac. Mašinski fakultet Univerziteta u Kragujevcu. Str. 482.
199. Posada, FR., and Bandivadekar, AN. (2015). Global overview of on-board diagnostic (OBD) systems for heavy-duty vehicles. ICCT, no. January. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_Overview_OBD-HDVs_20150209.pdf
200. Miller, J., Sen, A., and Teter, J. (2024). *Status of vehicle standards in Europe and North America*. International Council on Clean Transportation (ICCT). https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/05/Vehicle-Standards-Europe-North-America-2024.pdf
201. Directive 98/69/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998 relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles and amending Council Directive 70/220/EEC. http://data.europa.eu/eli/dir/1998/69/oj (zamenjena Uredbom 715/2007/EC)
202. Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. http://data.europa.eu/eli/reg/2007/715/oj
203. Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council of 5 September 2007 establishing a framework for the approval of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles. http://data.europa.eu/eli/dir/2007/46/oj (zamenjena Uredbom 715/2007/EC)
204. Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the approval and market surveillance of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, amending Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009 and repealing Directive 2007/46/EC. http://data.europa.eu/eli/reg/2018/858/oj
205. Stepper, M. R., Butler, S. R., and Zhu, G. G. (1995). On-Board Diagnostics, A Heavy Duty Perspective. SAE Technical Paper Series. https://doi.org/10.4271/951947
206. Shu, Y., Xu, P., Niu, X., Chen, Q., Qiao, L., and Liu, J. (2022). High-rate attitude determination of moving vehicles with GNSS: GPS, BDS, GLONASS, and Galileo. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *71*, 1-13. http://doi.org/10.1109/tim.2022.3168896

207. Borenstein, J., and Feng, L. (1996). Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. *IEEE Transactions on robotics and automation, 12(6)*, 869-880. http://doi.org/10.1109/70.544770
208. Kuchar, P., Janoško, I., Holúbek, M., Čedík, J., and Pexa, M. (2022). The Accuracy Assessment of Devices Used for Distance Measuring in Dynamic Vehicle Tests. *Acta Technologica Agriculturae, 25(3)*, 150-156. https://doi.org/10.2478/ata-2022-0023
209. Fazekas, M., and Gáspár, P. (2024). Wheel odometry model calibration with neural network-based weighting. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 134*, 108631. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108631
210. Andreae, M. and Z. Sun (2012). Powertrain Cycle for Emission Certification. *SAE International Journal of Commercial Vehicles 5(2)*. 650-656. https://doi.org/10.4271/2012-01-2059
211. Hallsten, M. (2009). Metoder för mätning och simulering av bränsle förbrukning och emissioner från tunga fordon. https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:542763/FULLTEXT01.pdf
212. Commission Implementing Regulation (EU) 2025/2161 of 27 October 2025 implementing Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council as regards the technical requirements of on-board devices for the monitoring and recording of fuel and energy consumption and mileage of certain heavy-duty vehicles, and for determining and recording the payload or total weight. http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2025/2161/oj
213. Ministarstvo privrede. (2023). Pravilnik o overavanju merila i mernih sistema za neprekidno i dinamičko merenje količina tečnosti koje nisu voda – uređaja za točenje goriva. Službeni glasnik RS, 96/2023.
214. Ministarstvo privrede. (2020). Pravilnik o vrstama merila koja podležu zakonskoj kontroli. Službeni glasnik RS, 93/2020.
215. United Nations Economic Commission for Europe. (2025). UN Regulation No 39 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the speedometer and odometer equipment including its installation [2025/1902]. http://data.europa.eu/eli/reg/2025/1902/oj
216. Javno preduzeće putevi Srbije, GIS portal. Dostupno na: https://www.putevi-srbije.rs/index.php/referentni-sistem
217. Robert Bosch GmbH. (2022). Automotive Handbook, (11th edition).
218. World Bank. (2009). Serbia: How to do more with less. Confronting the fiscal crisis through increased public sector productivity (Report No. 48620-YF)
219. RHMZ. Republički Hidrometeorološki zavod Srbije. Dostupno na: https://www.hidmet.gov.rs
220. Bogner, M., i Isailović, M. (2016). *Tehnički gasov*i. Beograd: ETA (Zemun: Unagraf), str. 297.
221. Topenčarević, Lj. (1987). *Organizacija i tehnologija drumskog transporta*. Beograd: Građevinska knjiga, str. 421.
222. Ivković, I. (2017). *Motorna vozila: uputstvo za izradu godišnjeg zadatka (1. izd.)*. Saobraćajni fakultet, Univerziteta u Beogradu, str. 147.
223. Đorđević, B., Valent, V., Šerbanović, S. (2005). *Termodinamika sa termotehnikom (4. izd.)*. Beograd: Tehnološko-metalurški fakultet, Univerziteta u Beogradu, str. 671.
224. Bunčić, S. (2000). *Tehnicka eksploatacija motornih vozila I*. Beograd: Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu. Izdavačka delatnost Saobraćajnog fakulteta u Beogradu, str. 206.
225. Kuzović, Lj., i Topolnik D. (1989). *Kapacitet drumskih saobraćajnica*. Beograd: Građevinska knjiga, str. 295.
226. Kuzović, Lj. (1987). *Teorija saobraćajnog toka*. Beograd: Građevinska knjiga, str. 221.
227. Kuzović, Lj. (1994). *Vrednovanje u upravljanju razvojem i eksploatacijom putne mreže*. Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu., Beograd, Jugoslavija. str. 278.
228. Newton, S., (2009). Serbian National Transport Model System, Report No. R20090181/30670000/SNE/RLO, Zoetermeer, Netherlands.

229. Trzciński, G., Moskalik, T., and Wojtan, R. (2018). Total weight and axle loads of truck units in the transport of timber depending on the timber cargo. *Forests, 9(4)*, 164. https://doi.org/10.3390/f9040164
230. DAF Bodybuilder Information - DAF BBI - tehnical specification. Dostupno na: https://www.dafbbi.com/en (Pristupano 23.11.2023.)
231. Bodybuilder Portal - Mercedes-Benz Trucks - tehnical data – specification. Dostupno na: https://bb-portal.mercedes-benz.com/ (Pristupano 23.11.2023.)
232. Iveco Body Builders - tehnical specification. Dostupno na: https://newibb.iveco.com/en/Pages/Home.aspx (Pristupano 23.11.2023.)
233. Pravilnik o podeli motornih i priključnih vozila i tehničkim uslovima za vozila u saobraćaju na putevima, ("Sl. glasnik RS", 48/2023), Available from Internet: https://www.mgsi.gov.rs/lat/dokumenti/bezbednost-saobracaja
234. Simić, D. (1988). *Motorna vozila (3. izd.)*. Beograd: IRO Naučna knjiga, str. 325.
235. Demić., M. i Lukić, J. (2011). *Teorija kretanja motornih vozila*. Kragujevac: Mašinski fakultet u Kragujevcu, str. 217.
236. Husainov, A. Sh., and Selifonov, V. V. (2008). *Theory of the vehicles.* Lecture notes, VV Selifonov–Ulyanovsk: Approved by the university's editorial and publishing council as a teaching aid. (in russian: Хусаинов, А. Ш., и Селифонов, В. В. (2008). *Теория автомобиля.* Конспект лекций, ВВ Селифонов–Ульяновск: Утверждено редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия), str. 119.
237. Selifonov, V. V., Husainov, A. Sh., and Lomakin, V. V. (2007). *Theory of the vehicles.* Moscow State Technical University - MAMI). (in russian: Селифонов, В. В., Хусаинов, А. Ш., и Ломакин, В. В. (2007). *Теория автомобиля.* Московский государственный технический университет - МАМИ. Москва), str. 102.
238. Janković, D., and Todorović, J. (1990). *Teorija kretanja motornih vozila.* Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu. Komisija za izdavačku delatnost Mašinskog fakulteta u Beogradu, str. 436.
239. Wong, J. Y. (2022). *Theory of ground vehicles*. John Wiley and Sons, str. 523.
240. Paterlini, G., Yucel, S., Lucking, M. M., and Magnuson, J. (2015). Rolling resistance validation. Minnesota Department of Transportation, Tech. Rep. https://trid.trb.org/View/1377295
241. Hyttinen, J., Ussner, M., Österlöf, R., Jerrelind, J., and Drugge, L. (2023). Truck tyre transient rolling resistance and temperature at varying vehicle velocities-Measurements and simulations. *Polymer testing, 122*, 108004. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108004
242. Rexeis, M., Hausberger, S., Riemersma, I., Tartakovsky, L., Zvirin, Y., van Poppel, M. and Cornelis, E. (2005). Heavy duty vehicle emissions. Final report. (WP400). DGTREN Contract 1999-RD. 10429. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/home
243. Hammarström, U., Karlsson, R., Sörensen, H., and Yahya, M. R. (2012). Coastdown measurement with 60-tonne truck and trailer: estimation of transmission, rolling and air resistance. https://trid.trb.org/View/1215466
244. Kang, S., Ozer, H., Al-Qadi, I. L., and Spencer, B. F. (2019). Stochastic analysis of rolling resistance energy dissipation for a tractor-trailer model. *Transportation Research Record, 2673(11)*, 593-603. https://doi.org/10.1177/0361198119840344
245. Sandberg, U., Hammarström, U., Haider, M., Conter, M., Goubert, L., Bergiers, A., ... and Harvey, J. T. (2011). Rolling resistance: basic information and state-of-the-art on measurement methods. Final version. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vti:diva-5196
246. Heisler, H. (2002). *Advanced vehicle technology, (2nd edition).* Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5131-8.X5000-3
247. Dedović, V., Mladenović, D., and Sekulić, D. (2017). *Dinamika vozila.* Beograd: Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu. Izdavačka delatnost Saobraćajnog fakulteta u Beogradu. Str. 269.
248. Landman, D., Wood, R., Seay, W., and Bledsoe, J. (2009). Understanding practical limits to heavy truck drag reduction. *SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2(2)*. https://doi.org/10.4271/2009-01-2890

249. Landman, D., Cragun, M., McCormick, M., and Wood, R. (2011). Drag reduction of a modern straight truck. *SAE International Journal of Commercial Vehicles, 4(1)*. https://doi.org/10.4271/2011-01-2283
250. Brennan, D. D., Worm, J., and Morgan, C. (2013). Determination of vehicle frontal area using image processing (No. 2013-01-0203). SAE Technical Paper. https://doi.org/10.4271/2013-01-0203
251. Emam, M. A. (2011). A New Empirical Formula for Calculating Vehicles' Frontal Area (No. 2011-01-0763). SAE Technical Paper. https://doi.org/10.4271/2011-01-0763
252. Litvinov, A. S., and Farobin, Y. E. (1989). *Automobile. Theory of operational properties*. Mashinostroenie, Moscow. (in russian: Литвинов, А. С., и Фаробин, Y. E. (1989). *Автомобил. Теориуа експлуататсионнукх своуств*. Масхиностроуениуе. Москва), str. 230.
253. Irimescu, A., Mihon, L., and Pădure, G. (2011). Automotive transmission efficiency measurement using a chassis dynamometer. International Journal of Automotive Technology, 12, 555-559. https://doi.org/10.1007/s12239-011-0065-1
254. Kravets, V., Musarsky, R., and Tumasov, A. (2015). Technique for Determining the Fuel Consumption of a Vehicle on a Given Route. *In 2nd International Conference on Modelling, Identification and Control (pp. 36-38)*. Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/mic-15.2015.8
255. Ben-Chaim, M., Shmerling, E., and Kuperman, A. (2013). Analytic Modeling of Vehicle Fuel Consumption. *Energies, 6 (1)*: 117–127. https://doi.org/10.3390/en6010117
256. Bas, K. M., Kravets, V. V., Ziborov, K. A., Fedoriachenko, D. A., Krivda, V. V., Fedoriachenko, S. A., and Kornilenko, I. O. (2017). Mathematical Models of Hybrid Vehicle Powertrain Performance. *Mechanics, Materials Science and Engineering Journal, 7*. https://doi.org/10.26552/com.C.2025.028
257. Mamontov, A., Shevtsov, V., and Rezvaya, K. (2022). Traction and dynamic, fuel and economic calculation of the vehicle. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" – Kharkiv : NTU "KhPI". – 104 p. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/56049
258. Martyr, A. J., and Plint, M. A. (2012). *Engine testing: the design, building, modification and use of powertrain test facilities*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2010-0-66322-X
259. Iveco Body Builders - tehnical specification. Dostupno na: https://newibb.iveco.com/en/Pages/Home.aspx (Pristupano 23.11.2023.)
260. FPT Industrial (FPT, 2025). Commercial transport solutions. The family of truck engines. https://www.fptindustrial.com/en (Pristupano 23.11.2023.)
261. Bodybuilder Portal Mercedes-Benz Trucks – tehnical data – specification. Dostupno na: https://bb-portal.mercedes-benz.com (Pristupano 23.11.2023.)
262. Golverk, A. A. (1994). The Method for Development of a Diesel Engine Universal Performance Map. *SAE Technical Paper Series.* https://doi.org/10.4271/941928
263. Shayler, P. J., Chick, J. P., and Eade, D. (1999). A Method of Predicting Brake Specific Fuel Consumption Maps. *SAE Technical Paper Series.* https://doi.org/10.4271/1999-01-0556
264. Durković, R., i Grujičić, R. (2018). An approach to determine the minimum specific fuel consumption and engine economical operation curve model. *Measurement, 132*, 303-308. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.053
265. Kreyer, J. O., Müller, M., and Esch, T. (2019). A map-based model for the determination of fuel consumption for internal combustion engines as a function of flight altitude. *Bonn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV.* DocumentID: 490162. https://doi.org/10.1108/AEAT-09-2020-0196
266. Bao, F. B. (2011). Research on Calculation Method of Fuel Consumption Rate Base on Engine Universal Characteristics. *Advanced Materials Research, 239-242*, 1490–1494. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.239-242.1490
267. Masser, R., and Hoffmann, K. H. (2021). Optimal control for a hydraulic recuperation system using endoreversible thermodynamics. *Applied Sciences, 11(11)*, 5001. https://doi.org/10.3390/app11115001

268. Scheiber, K. M., Nowak, N., Lorenz, M. L., Pfeil, J., Koch, T., and Kasper, G. (2021). Comparison of four diesel engines with regard to blow-by aerosol properties as a basis for reduction strategies based on engine design and operation. *Automotive and Engine Technology, 6*, 79-90. https://doi.org/10.1007/s41104-021-00075-4
269. De Simio, L., Iannaccone, S., Guido, C., Napolitano, P., and Maiello, A. (2024). Natural Gas/Hydrogen blends for heavy-duty spark ignition engines: Performance and emissions analysis. *International journal of hydrogen energy, 50*, 743-757. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.194
270. Naber, J. D., Henes, R., and Henes, E. (2020). High BMEP and High Efficiency Micro-Pilot Ignition Natural Gas Engine (Final Project Report). Michigan Technological Univ., Houghton, MI (United States). EE0007331. https://www.osti.gov/servlets/purl/1605097
271. Cvetanović, A., i Banić, B. (2007). *Kolovozne konstrukcije*. Akademska misao. str. 389.
272. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Transportation Research Board. (2000). Highway Capacity Manual. (TRB, 2000). Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/895
273. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Transportation Research Board. (2022). Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. (TRB, 2022). Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/26432
274. Zakon o bezbednosti saobraćaja na putevima ("sl. glasnik rs", br. 19/2025). dostupno na: https://www.mgsi.gov.rs/
275. Ivković, I, i Spasić, M. (2023). *Motorna vozila, zbirka rešenih zadataka*. Beograd: Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, str. 163.
276. Jerosimić, S. (2019). Matematičke metode u fizičkoj hemiji – Regresiona analiza (skripta). Beograd: Fakultet za fizičku hemiju Univerziteta u Beogradu, str. 10. Dostupno na: https://www.ffh.bg.ac.rs/wp-content/uploads/2019/11/Regresiona-analiza-pregled.pdf
277. Ntziachristos, L., and Samaras, Z. (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Road transport (Update October 2020). European Environment Agency. (EEA, 2020). https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019
278. Ntziachristos, L., and Samaras, Z. (2023). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023: Road transport (Update October 2024). European Environment Agency. (EEA, 2024). https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023
279. Vašalić, D., Ivković, I., Mladenović, D., Sekulić, D., Miličević, D., and Suljovrujić, E. (2024). Prediction of fuel and exhaust emission costs of heavy-duty vehicles intended for gas transportation. *Sustainability, 16(13)*, 5407. https://doi.org/10.3390/su16135407
280. Vašalić, D. Z., Ivković, I. S., Kaplanović, S. M., Miličević, D. S., Mladenović, D. M., Sekulić, D. S., and Suljovrujić, E. H. (2025). Modelling of fuel consumption and fuel cost analysis for vehicles combination intended for compressed natural gas transportation. Thermal Science, (00), 72-72. https://doi.org/10.2298/TSCI241208072V
281. Wang, J., Gui, H., Yang, Z., Yu, T., Zhang, X., and Liu, J. (2022). Real-world gaseous emission characteristics of natural gas heavy-duty sanitation trucks. *Journal of Environmental Sciences, 115*, 319-329. https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.06.023
282. Zheng, F., Zhang, H., Yin, H., Fu, M., Jiang, H., Li, J., and Ding, Y. (2022). Evaluation of real-world emissions of China V heavy-duty vehicles fueled by diesel, CNG and LNG on various road types. *Chemosphere, 303*, 135137. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135137
283. HBEFA. (2025). *HBEFA 5.1: Documentation of updates*. INFRAS. https://www.hbefa.net
284. Preiss, P., Friedrich, R., and Klotz, V. (2008). NEEDS – New Energy Externalities Development for Sustainability: *Report on the procedure and data to generate averaged/aggregated data (Deliverable No. 1.1, RS-3a)*. European Commission, Sixth Framework Programme (FP6). https://cordis.europa.eu/project/id/502687/results

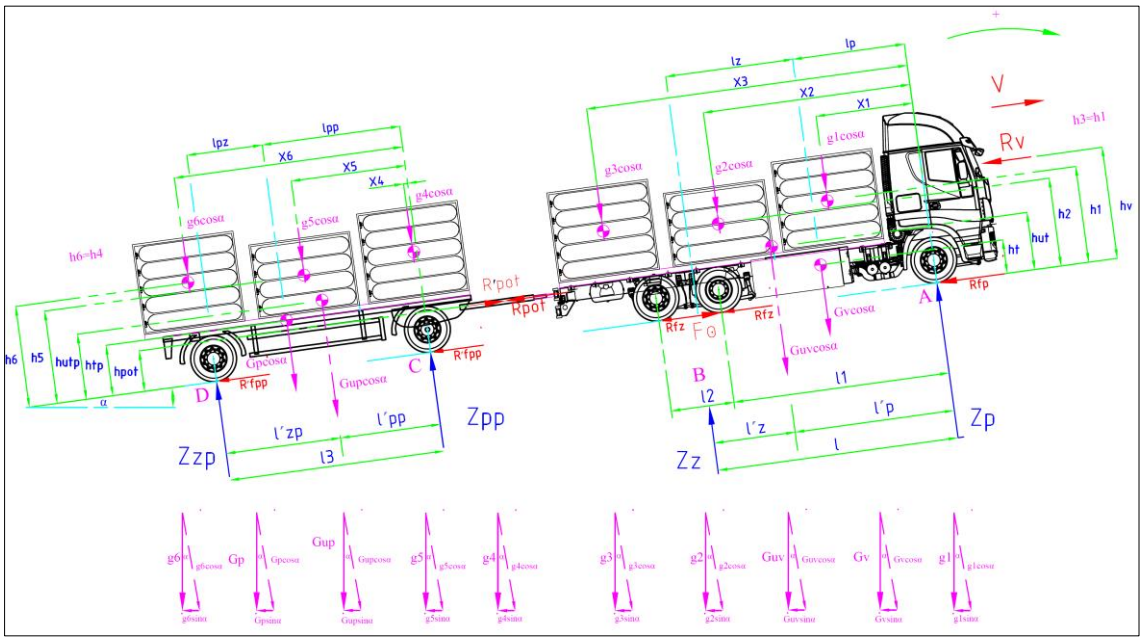
285. European Commission. (2001). The Clean Air for Europe (CAFE) programme: Towards a thematic strategy for air quality (COM(2001) 245 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=legissum%3Al28026
286. European Commission. (2003). NEWEXT – New elements for the assessment of external costs from energy technologies (ENG1-CT-2000-00129). CORDIS. https://cordis.europa.eu/programme/id/FP5-EESD/en
287. Bickel, P., and Friedrich, R. (2005). ExternE: Externalities of energy – Methodology 2005 update (EUR 21951). European Commission, DG Research. http://dx.doi.org/10.18419/opus-11923
288. European Commission. (2006). HEATCO – Developing harmonised European approaches for transport costing and project assessment (502481). CORDIS. https://trimis.ec.europa.eu/project/developing-harmonised-european-approaches-transport-costing-and-project-assessment
289. European Commission. (2008). CASES – Cost assessment for sustainable energy systems (518294). CORDIS. https://cordis.europa.eu/project/id/518294/reporting
290. European Commission. (2009). NEEDS – New Energy Externalities Developments for Sustainability (502687). CORDIS. https://cordis.europa.eu/project/id/502687/reporting
291. International Institute for Applied Systems Analysis. (2011). GAINS: Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies (model documentation). IIASA. https://iiasa.ac.at/models-tools-data/gains
292. Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., Klimont, Z., Nguyen, B., Posch, M., Rafaj, P., Sandler, R., Schöpp, W., Wagner, F., Winiwarter, W. (2011). Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications. *Environmental Modelling and Software, 26 (12)*, pp. 1489-1501. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.012
293. Van Essen, H., Van Wijngaarden, L., Schroten, A., Sutter, D., Bieler, C., Maffii, S., ... and El Beyrouty, K. (2019). Handbook on the external costs of transport, version 2019 (No. 18.4 K83. 131). http://worldcat.org/isbn/9789279969171
294. Schucht, S., Real, E., Létinois, L., Colette, A., Holland, M., Spadaro, J. V., Opie, L., Brook, R., Garland, L., Gibbs, M., Calero, J., Zeiger, B., Rouïl, L., Brignon, J.-M., and German, R. (2020). Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2017. Eionet Report ETC/ATNI No 2020/4. European Topic Centre on Air Pollution, Transport, Noise and Industrial Pollution. https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-atni-report-04-2020-costs-of-air-pollution-from-european-industrial-facilities-200820132017
295. European Environment Agency. (2024). *The costs to health and the environment from industrial air pollution in Europe – 2024 update*. European Environment Agency. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/the-costs-to-health-and-the-environment-from-industrial-air-pollution-in-europe-2024-update
296. Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases (IWG SC–GHG). (2016). *Technical support document: Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis under Executive Order 12866.* United States Government. https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPPT-2021-0057-0093
297. Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases (IWG SC–GHG). (2021). *Technical support document: Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis under Executive Order 13990.* United States Government. https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPPT-2021-0057-0097
298. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate change 2007: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/
299. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/

300. Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., Van Essen, H. P., Boon, B. H., Smokers, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, Bak, M. (2008). Handbook on estimation of external cost in the transport sector. Ce Delft. https://transport.ec.europa.eu/system/files/2016-09/2008_costs_handbook.pdf
301. Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier, H., Gibson, G., Varma, A., Cox, V. (2014). Update of the handbook on external costs of transport: final report for the European Commission: DG-MOVE. https://transport.ec.europa.eu/system/files/2016-09/2014-handbook-external-costs-transport.pdf
302. De Palma, A., Lindsey, R., Quinet, E., and Vickerman, R. (Eds.). (2011). A handbook of transport economics. Edward Elgar Publishing. pp 887.
303. Matthews, C. (2001). Engineers' guide to pressure equipment. Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St Edmunds, UK, ISBN, 1(86058298), 2.
304. Zakon o transportu opasne robe ("Sl. glasnik RS", br. 104/16, 83/18, 95/18 - dr. zakon i 10/19 - dr. zakon), dostupno na: https://www.mgsi.gov.rs/
305. Zakon o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti ("Sl. glasnik RS", br. 49/21), dostupno na: https://www.mgsi.gov.rs/
306. Uredba o pokretnoj opremi pod pritiskom ("Sl. glasnik RS", br. 120/17), dostupno na: https://www.mgsi.gov.rs/
307. Uredba o imenovanju tela za ocenjivanje usaglašenosti ("Sl. glasnik RS", br. 18/22), dostupno na: https://www.mgsi.gov.rs/
308. Mokhatab, S., Poe, A. W., Speight, J. G. (2006). *Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices*. Gulf professional publishing. https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7776-9.x5000-3
309. Bogner, M., i Isailović, M. (2008). *Prirodni gas*. Beograd: ETA (Zemun: Unagraf), str. 578.
310. Faramawy, S., Zaki, T., and Sakr, A. E. (2016). Natural gas origin, composition, and processing: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *34*, 34-54. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.030
311. John, E., and Singh, K. (2011). Production and properties of fuels from domestic and industrial waste. *The Royal Society of Chemis*try. https://doi.org/10.1039/9781849731027-00333
312. Singh, R. S., Pandey, A., and Gnansounou, E. (2016). *Biofuels: production and future perspectives* (Eds. 1). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315370743
313. Speight, J. G. (2013). *Heavy oil production processes*. Gulf Professional Publishing. https://doi.org/10.1016/C2012-0-00598-4
314. Ahmadi, G., Ji, C., and Smith, D. H. (2007). Production of natural gas from methane hydrate by a constant downhole pressure well. *Energy conversion and Management, 48(7)*. 2053-2068. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.01.015
315. You, K., Flemings, P. B., Malinverno, A., Collett, T. S., and Darnell, K. (2019). Mechanisms of methane hydrate formation in geological systems. *Reviews of Geophysics, 57(4)*. 1146-1196. https://doi.org/10.1029/2018RG000638
316. Ignjatović, M., Ljubojev, M., Mitić, D., i Stojanović, Z. (2009). Uljni škriljci kao energetski potencijal Republike Srbije. Rudarski radovi, Bor, 1, 23-32. UDK: 662.67(045)=861. https://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=1451-01620901023I&lang=sr
317. Centner, T. J. (2013). Oversight of shale gas production in the United States and the disclosure of toxic substances. *Resources Policy, 38(3)*. 233-240. http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.03.001
318. Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology, 85*. 849-860. http://dx.doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7
319. Moore, T. A. (2012). Coalbed methane: a review. *International Journal of Coal Geology, 101*. 36-81. http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2012.05.011
320. Pušin, I., i Katić, V. (2019). *Modelovanje I Ispitivanje Biogasne Elektrane–Primer "Pik Moravica"*. Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, 34(09), 1575-1578.

321. Uredba o uslovima isporuke i snabdevanja prirodnim gasom ("Sl. glasnik RS", br. 49/2022, 32/2023 i 97/2023). https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/vlada/uredba/2022/49/1/reg
322. Srbijagas. *Sastav prirodnog gasa*. Preuzeto 12. decembra 2024. godine, sa https://www.srbijagas.com
323. The LibreTexts libraries. *A8: van der Waal's Constants for Real Ga*ses. Preuzeto 12. decembra 2024. godine, sa: https://chem.libretexts
324. Đorđević, B., Valent, V., Šerbanović, S. i Radojković, N. (1989). Termodinamika i termotehnika : priručnik : teorijski uvodi, rešeni primeri, zadaci na računaru. Beograd: Građevinska knjiga, str. 500.
325. Kaye, G. W. C., and Laby, T. H. (1995). Tables of physical and chemical constants (16th ed.). Longman Publishing Group, Harlow, UK.
326. Lide, D. R. (2004). *CRC handbook of chemistry and physics* (Vol. 85). CRC press.
327. GPSA, Gas Processors Suppliers Association. (2004). *Engineering Data Book* Volumes *I and II* (Eds. 12). Tulsa: Gas Processors Association.
328. Sadžaković, M., Antonić, M., Glušica, D., Bogner, M. (2015). *Priručnik za gasnu tehniku*. Beograd: ETA (Zemun: Unagraf), str. 354.
329. SAE J1850. Class B Data Communications Network Interface (SAE).
330. SAE J1939. Serial Control And Communications Heavy-Duty Vehicle Network—Top-Level Document.
331. ISO 9141. Road Vehicles — Diagnostic Systems — Requirements For Interchange Of Digital Information.
332. SAE J1962. Diagnostic Conector.
333. ISO 14230. Road vehicles — Diagnostic systems — Keyword Protocol 2000.
334. ISO 15765. Road vehicles — Diagnostic communication over Controller Area Network (DoCAN).
335. ISO 15031. Road Vehicles–Communication Between Vehicle And External Equipment For Emissions–Related Diagnostics–Part 5: Emissions-Related Diagnostic Services.
336. SAE J1708: Serial Data Communications Between Microcomputer Systems In Heavy-Duty Vehicle Applications.
337. SAE J1587: Electronic Data Interchange Between Microcomputer Systems In Heavy-Duty Vehicle Applications.

PRILOG 1

Sile i reakcije tla koje deluju na sastav vučnog vozila i prikolice sa baterijskom nadgradnjom opremljenom sa posudama Tip–1



Slika P1.1. Sile i reakcije tla koje deluju na sastav vučnog vozila i prikolice sa baterijskom nadgradnjom na usponu

(Izvor: vučno vozilo: Iveco – technical drawings, priključno vozilo i nadgradnje: Autor)

Na osnovu Slike P1.1 određene su sile i reakcije tla koje deluju na sastav, vučnog vozila i prikolice sa baterijskim nadgradnjama i posudama Tip–1. Sile su određene za uslove pravolinijskog kretanja konstantnom brzinom na usponu, uz pretpostavku da reakcije tla deluju podjednako na leve i desne točkove vozila.

Oznake na slici su: G_{uv} – ukupna težina vučnog vozila, G_{up} – ukupna težina priključnog vozila, G_v – težina vučnog vozila bez nadgradnje, G_{up} – težina priključnog vozila bez nadgradnje, gi – težine gasnih kontejnera, $G\ cos\alpha$ – komponenta težine normalna na tlo vozila sa napadnom tačkom u težištu vozila, $G\ sin\alpha = R_u$ – komponenta težine vozila paralelna sa tlom i sa napadnom tačkom u težištu vozila (otpor uspona), F_o – obimna sila na pogonskim točkovima, R_{fp} – otpor kotrljanja na upravljačkoj osovini vučnog vozila, R_{fz} – otpor kotrljanja na pogonskoj osovini vučnog vozila, R_v – otpor vazduha vučnog vozila, R'_{fpp} – otpor kotrljanja vođenih točkova priključnog vozila, R_p – otpor na poteznici, l_1 – međuosovinsko rastojanje između prve i druge osovine, l_2 – međuosovinsko rastojanje između druge i treće osovine, l – teorijsko međuosovinsko rastojanje vučnog vozila, l_p, l_z, l'_p i l'_z – koordinate težišta vučnog vozila paralelne sa tlom, l_3 – međuosovinsko rastojanje priključnog vozila, l_{pp}, l_{zp}, l'_{pp} i l'_{zp} – koordinate težišta priključnog vozila paralelne sa tlom, Z_p – normalna reakcija tla na prvoj (upravljačkoj osovini vučnog vozila), Z_z – normalna reakcija tla na drugoj (pogonskoj osovini vučnog vozila), Z_{pp} – normalna reakcija tla na prvoj osovini priključnog vozila, Z_{zp} – normalna reakcija tla na drugoj osovini priključnog vozila, h_t – visina težišta vučnog vozila bez nadgradnje, h_{ut} – visina težišta vučnog vozila sa nadgradnjom, h_{tp} – visina težišta priključnog vozila bez nadgradnje, h_{utp} – visina težišta priključnog vozila sa nadgradnjom, h_v – visina metacentra, h_{pot} – visina poteznice, h_i – visina težišta gasnih kontejnara, x_i – koordinate težišta gasnih kontejnera, α – nagibni ugao deonice trase.

Konstruktivno rešenje baterijske nadgradnje sa gasnim kontejnerima Tip–1 sastoji se od više zasebnih kontejnera postavljenih na definisanim rastojanjima u odnosu na osu prve osovine vučnog i priključnog vozila. Čelični kontejneri sa horizontalno postavljenim posudama pod pritiskom Tip–1 omogućavaju koncentrisana opterećenja na određenim delovima tovarnog prostora vučnog i priključnog vozila. Broj

posuda po kontejneru zavisi od položaja ugradnje na tovarnom prostoru i dozvoljenih osovinskih opterećenja, pri čemu se manji broj posuda nalazi u međuosovinskoj zoni. Osnovni razlog preraspodele broja posuda su maseni parametri, a posude Tip–1 detaljno su opisane u Poglavlju 3. Veza između vozila i nadgradnji je fiksna i ostvaruje se vijčanom vezom. Sile koje deluju u pravcu kretanja sastava, određene su izrazima [1.1], [1.2] i [1.3]:

$$\Sigma X_i = 0$$
$$F_o = \Sigma R_f + R_v + G_{uv} \times \sin\alpha + R_p \qquad [1.1]$$
$$F_o = \left(R_{f_v} + R_{f_p} + R_{f_v}\right) + R_v + G_{uv} \times \sin\alpha + R_p$$

- Posmatrajući samo prikolicu:

$$R_p = R'_{vp} + \Sigma R'_{fpp} + G_{up} \times \sin\alpha$$
$$R_p = R'_{vp} + \left(R'_{f_v} + R'_{f_v}\right) + G_{up} \times \sin\alpha \qquad [1.2]$$
$$R_p = R'_{vp} + \left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + (G_p + g_4 + g_5 + g_6) \times \sin\alpha$$

Težine vučnog i priključnog vozila:

$$G_{uv} = G_v + G_{nv} = G_v + g_1 + g_2 + g_3$$
$$G_{up} = G_p + G_{np} = G_p + g_4 + g_5 + g_6 \qquad [1.3]$$

Vertikalne (normalne) komponente težine vozila:

- Vertikalno opterećenje na zadnje osovine vučnog vozila usled dejstva sila G_v, g_1, g_2 i g_3.

$$\frac{G_{uv} \times \cos\alpha \times l'_p}{l} = \frac{(G_v \times l_p + g_1 \times x_1 + g_2 \times x_2 + g_3 \times x_3) \times \cos\alpha}{l} \qquad [1.4]$$

- Vertikalno opterećenje na zadnju osovinu priključnog vozila usled dejstva sila G_p, g_4, g_5 i g_6.

$$\frac{G_{up} \times \cos\alpha \times l'_{pp}}{l_3} = \frac{(G_{np} \times l_{pp} + g_4 \times x_4 + g_5 \times x_5 + g_6 \times x_6) \times \cos\alpha}{l_3} \qquad [1.5]$$

Horizontalne komponente težine vozila:

- Horizontalno opterećenje na zadnje osovine vučnog vozila usled dejstva sila G_v, g_1, g_2 i g_3.

$$\frac{G_{nv} \times \sin\alpha \times h_{ut}}{l} = \frac{(G_v \times h_t + g_1 \times h_1 + g_2 \times h_2 + g_3 \times h_1) \times \sin\alpha}{l} \qquad [1.6]$$

- Horizontalno opterećenje na zadnju osovinu priključnog vozila usled dejstva sila G_p, g_4, g_5 i g_6.

$$\frac{G_{np} \times \sin\alpha \times h_{utp}}{l_3} = \frac{(G_p \times h_{tp} + g_4 \times h_6 + g_5 \times h_5 + g_6 \times h_6) \times \sin\alpha}{l_3} \qquad [1.7]$$

Otpori kotrljanja vučnog i priključnog vozila:

- vučno vozilo

$$R_f = \left(G_{1v} \times f_v + G_{2v} \times f_p + G_{3v} \times f_v\right) \times \cos\alpha \qquad [1.8]$$

- priključno vozilo

$$R'_f = \left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v\right) \cdot \cos\alpha \qquad [1.9]$$

Otpor vazduha vučnog i priključnog vozila:

- otpor vazduha vučnog vozila

$$R_v = \frac{c_x \times \rho}{2} \times A \times \left(V \pm V_v\right)^2 \qquad [1.10]$$

- otpor vazduha skupa vozila

$$R_{sv} = 1{,}15 \times R_v = 1{,}15 \times \left(\frac{c_x \times \rho}{2} \times A \times \left(V \pm V_v\right)^2\right) \qquad [1.11]$$

Zamenom vrednosti izraza [1.11], [1.2] u izraz [1.1] sile koje deluju u pravcu kretanja transportnog sastava prikazane su izrazom [1.12]:

$$\begin{aligned} F_o = &\left(R_{f_v} + R_{f_p} + R_{f_v}\right) + 1{,}15 \times R_v + (G_v + G_{nv}) \times \sin\alpha + \\ &+ \left(R'_{f_v} + R'_{f_v}\right) + (G_p + G_{np}) \times \sin\alpha \end{aligned} \qquad [1.12]$$

Zamenom izraza [1.9], [1.11] u izraz [1.12] sile koje deluju u pravcu kretanja transportnog sastava u razvijenom obliku prikazane su izrazom [1.13]:

$$\begin{aligned} F_o = &\left(G_{1v} \times f_v + G_{2v} \times f_p + G_{3v} \times f_v\right) \times \cos\alpha + (G_v + g_1 + g_2 + g_3) \times \sin\alpha + \\ &+ 1{,}15 \times \left(\frac{c_x \times \rho}{2} \times A \times \left(V \pm V_v\right)^2\right) + \\ &+ \left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + (G_p + g_4 + g_5 + g_6) \times \sin\alpha \end{aligned} \qquad [1.13]$$

- Sile koje deluju na skup vozila u pravcu normalnom na tlo:

$$\begin{aligned} &\Sigma Y_i = 0 \\ &G_{uv} \times \cos\alpha + G_{up} \times \cos\alpha = Z_p + Z_z + Z_{pp} + Z_{zp} \end{aligned} \qquad [1.14]$$

Zamenom izraza [1.3] i [1.4] u izraz [1.14] sile koje deluju u pravcu normalnom na tlo u razvijenom obliku prikazane su izrazom [1.15]:

$$\left(G_v + g_1 + g_2 + g_3\right) \times \cos\alpha + \left(G_p + g_4 + g_5 + g_6\right) \times \cos\alpha = Z_p + Z_z + Z_{pp} + Z_{zp} \qquad [1.15]$$

Na osnovu jednačine ravnoteže momenata svih sila u odnosu na tačku delovanja, vertikalne reakcije na prednjim i zadnjim točkovima određene su pomoću izraza [1.16] i [1.17].

- Suma momenata svih sila za tačku oslonca (A) za prednje točkove vučnog vozila:

$$\Sigma M_A = 0$$
$$Z_z \times l = G_{uv} \sin\alpha \times h_{ut} - G_{uv} \cos\alpha \times l'_p + R_v \times h_v + R_p \times h_{pot} \quad [1.16]$$

- Suma momenata svih sila za tačku oslonca (B) za zadnje točkove vučnog vozila:

$$\Sigma M_B = 0$$
$$Z_p \times l = G_{uv} \cos\alpha \times l'_z - G_{uv} \sin\alpha \times h_{ut} - R_v \times h_v - R_p \times h_{pot} \quad [1.17]$$

Na osnovu izraza [1.16] i [1.17] normalne reakcije tla na prednjim i na zadnjim točkovima vučnog vozila prikazane su izrazima [1.18] i [1.19]:

- Na prednje točkove vučnog vozila:

$$Z_p = \frac{G_{uv} \cos\alpha \times l'_z - G_{uv} \sin\alpha \times h_{ut} - 1{,}15 \times R_v \times h_v - R_p \times h_{pot}}{l} \quad [1.18]$$

- Na zadnje točkove vučnog vozila:

$$Z_z = \frac{G_{uv} \sin\alpha \times h_{ut} - G_{uv} \cos\alpha \times l'_p + 1{,}15 \times R_v \times h_v + R_p \times h_{pot}}{l} \quad [1.19]$$

Određivanje teorijskog međuosovinskog rastojanja *l* kod teretnih vozila sa tri i više osovina zavisi od niza parametara, uključujući: oblik i namenu karoserije vozila, masene parametre, konfiguraciju pogona, međuosovinska rastojanja, sistem oslanjanja i elemente oslanjanja, krutost opruga i pritisak u pneumaticima. U analizama performansi teretnih vozila, vrednosti teorijskog međuosovinskog rastojanja određuju se analitičkim putem primenom složenih empirijskih formula ili na osnovu smernica proizvođača i pojednostavljenih izraza, koji uzimaju u obzir vrstu elastičnih elemenata oslanjanja, konfiguraciju pogona i masene parametre. Prema vrsti, elastične elemente oslanjanja možemo podeliti na dve grupe, na metalne (lisnate opruge (gibnjevi), zavojne opruge i torzinone opruge) i na nemetalne (gumeni elementi, pneumatski oslonci i hidropneumatski oslonci). Elastični elementi oslanjanja pored uticaja na oscilatorne karakteristike vozila tokom kretanja, značajno utiču na promenu položaja težišta vozila. Uticaji vrste elastičnih elemenata oslanjanja na vrednosti teorijskog međuosovinskog rastojanja, prikazani su izrazima [1.20] i [1.21]:

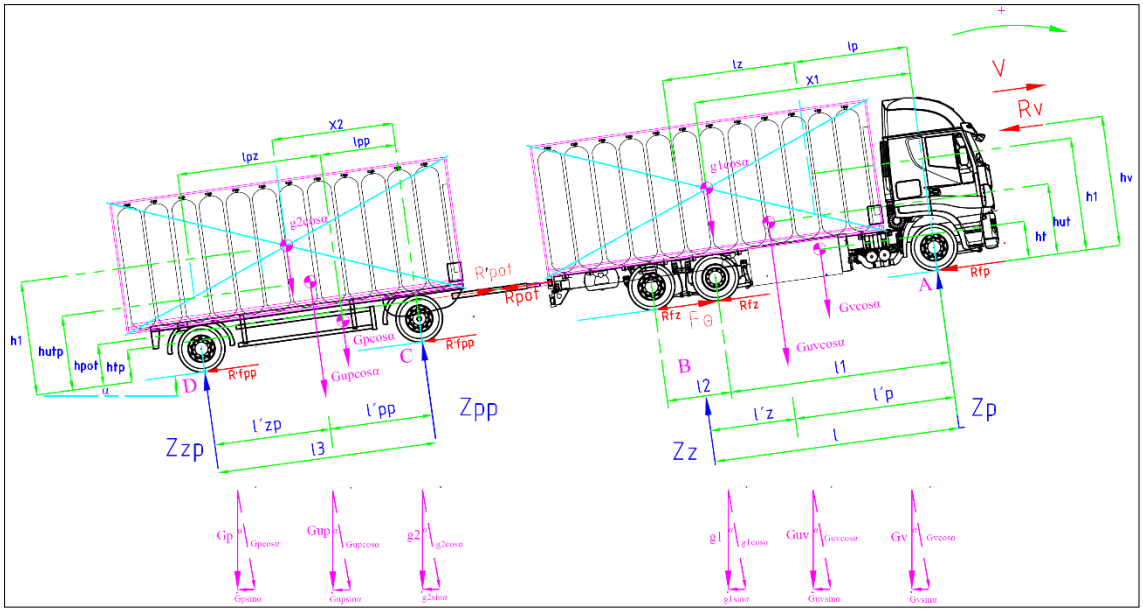
Za teretna vozila konfiguracije pogona 6x4, opremljena sa lisnatim oprugama (gibnjevima) [1.20]:

$$l = l_1 + \frac{l_2}{2} \quad [1.20]$$

Za teretna vozila konfiguracije pogona 6x2, opremljena sa pneumatskim osloncima [1.21]:

$$l = l_1 + \left(\frac{l_2 \times G_{2doz}}{G_{2doz} + G_{3doz}} \right) \quad [1.21]$$

Sile i reakcije tla koje deluju na sastav vučnog vozila i prikolice sa MEGC nadgradnjom opremljenom sa posudama Tip–4



Slika P1.2. Sile i reakcije tla koje deluju na sastav vučnog vozila i prikolice sa MEGC nadgradnjom
(Izvor: vučno vozilo: Iveco – technical drawings, priključno vozilo i nadgradnje: Autor)

Konstruktivno rešenje MEGC nadgradnje sa gasnim kontejnerima Tip–4 sastoji se od vertikalno postavljenih posuda pod pritiskom Tip–4, smeštenih unutar čeličnog rama jednog kontejnera. Ovakvo rešenje omogućava ravnomernu raspodelu opterećenja na tovarnom delu vozila. Povezivanje nadgradnje sa vozilom ostvaruje se putem sistema zaključavanja – veznim elementima. Na Slici P1.2 moguće je uočiti razlike između nadgradnje sa gasnim kontejnerima Tip–4 i Tip–1, koje se odnose na vrstu opterećenja – koncentrisano i ravnomerno raspoređeno opterećenje duž tovarnog dela vozila. Konstrukcija i karakteristike posuda Tip–4 detaljno su opisane u poglavlju 3.

Na osnovu Slike P1.2 određene su sile i reakcije tla koje deluju na sastav, vučnog vozila i prikolice sa MEGC nadgradnjama i posudama Tip–4. Sile su određene za uslove pravolinijskog kretanja konstantnom brzinom na usponu, uz pretpostavku da reakcije tla deluju podjednako na leve i desne točkove vozila.

Sile koje deluju u pravcu kretanja sastava, određene su izrazima [2.1] i [2.2]:

$$\Sigma X_i = 0$$
$$F_o = \left(R_{f_v} + R_{f_p} + R_{f_v}\right) + R_v + G_{uv} \times \sin\alpha + R_p \qquad [2.1]$$

- Posmatrajući samo prikolicu:

$$R_p = R'_{vp} + \left(R'_{f_v} + R'_{f_v}\right) + G_{up} \times \sin\alpha \qquad [2.2]$$

Težine vučnog i priključnog vozila:

- težina vučnog vozila

$$G_{uv} = G_v + G_{nv} = G_v + g_1 \qquad [2.3]$$

- težina priključnog vozila

$$G_{up} = G_p + G_{np} = G_p + g_2 \qquad [2.4]$$

Vertikalne (normalne) komponente težine vozila:

- Vertikalno opterećenje na zadnje osovine vučnog vozila usled dejstva sila G_v i g_1.

$$\frac{G_{uv} \times \cos\alpha \times l'_p}{l} = \frac{(G_v \times l_p + g_1 \times x_1) \times \cos\alpha}{l} \qquad [2.5]$$

- Vertikalno opterećenje na zadnju osovinu priključnog vozila usled dejstva sila G_p i g_2.

$$\frac{G_{up} \times \cos\alpha \times l'_{pp}}{l_3} = \frac{(G_{np} \times l_{pp} + g_2 \times x_2) \times \cos\alpha}{l_3} \qquad [2.6]$$

Horizontalne komponente težine vozila:

- Horizontalno opterećenje na zadnje osovine vučnog vozila usled dejstva sila G_v i g_1.

$$\frac{G_{nv} \times \sin\alpha \times h_{ut}}{l} = \frac{(G_v \times h_t + g_1 \times h_1) \times \sin\alpha}{l} \qquad [2.7]$$

- Horizontalno opterećenje na zadnju osovinu priključnog vozila usled dejstva sila G_p i g_2.

$$\frac{G_{np} \times \sin\alpha \times h_{utp}}{l_3} = \frac{(G_p \times h_{tp} + g_2 \times h_2) \times \sin\alpha}{l_3} \qquad [2.8]$$

Otpori kotrljanja vučnog i priključnog vozila prikazani su izrazima [1.9] i [1.10]. Otpor vazduha vučnog i priključnog vozila prikazani su izrazima [1.10] i [1.11].

Zamenom izraza [2.2], [2.3], [1.9], [1.10] i [1.12] u izraz [2.1], sile koje deluju u pravcu kretanja skupa vozila u razvijenom obliku prikazane su izrazom [2.9]:

$$\begin{aligned} F_o = {} & \left(G_{1v} \times f_v + G_{2v} \times f_p + G_{3v} \times f_v\right) \times \cos\alpha + (G_v + g_1) \times \sin\alpha + \\ & + 1{,}15 \times \left(\frac{c_x \times \rho}{2} \times A \times \left(V \pm V_v\right)^2\right) + \left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + (G_p + g_2) \times \sin\alpha \end{aligned} \qquad [2.9]$$

Sile koje deluju na skup vozila u pravcu normalnom na tlo:

$$\begin{aligned} & \Sigma Y_i = 0 \\ & \left(G_v + g_1\right) \cdot \cos\alpha + \left(G_p + g_2\right) \cdot \cos\alpha = Z_p + Z_z + Z_{pp} + Z_{zp} \end{aligned} \qquad [2.10]$$

Na osnovu jednačine ravnoteže momenata svih sila u odnosu na tačku delovanja, normalne dinamičke reakcije na prednjim i zadnjim točkovima određene su pomoću izraza [2.11] i [2.12].

- Suma momenata svih sila za tačku oslonca (A) za prednje točkove vučnog vozila:

$$\Sigma M_A = 0$$

$$Z_p = \frac{G_{uv}\cos\alpha \times l'_z - G_{uv}\sin\alpha \times h_{ut} - 1{,}15 \times R_v \times h_v - R_p \times h_{pot}}{l} \qquad [2.11]$$

- Suma momenata svih sila za tačku oslonca (B) za zadnje točkove vučnog vozila:

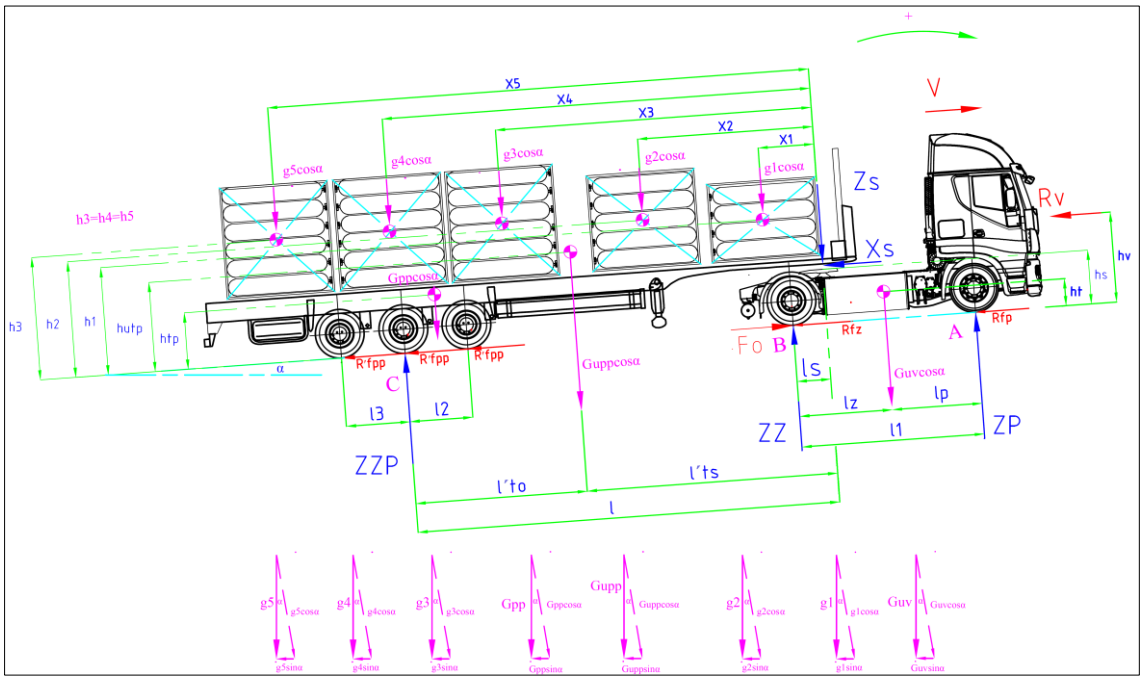
$$\Sigma M_B = 0$$

$$Z_z = \frac{G_{uv}\sin\alpha \times h_{ut} - G_{uv}\cos\alpha \times l'_p + 1{,}15 \times R_v \times h_v + R_p \times h_{pot}}{l} \qquad [2.12]$$

Na osnovu Slike P1.2 i zamenom prethodnih izraza u izraz [2.12] normalna dinamička reakcija tla na zadnjim točkovima u razvijenom obliku prikazana je izrazom [2.13]:

$$Z_z = \frac{(G_v \times h_t + g_1 \times h_1)\times\sin\alpha - (G_v \times l_p + g_1 \times x_1)\times\cos\alpha}{l} + \\ +1{,}15 \times \frac{\left(\frac{c_x \times \rho}{2} \times A \times (V \pm V_v)^2\right)}{l} \times h_v + \\ + \frac{\left((G_p + g_2)\times f_v \times\cos\alpha + (G_p + g_2)\times\sin\alpha\right)\times h_{pot}}{l} \qquad [2.13]$$

Sile i reakcije tla koje deluju na sastav tegljača i poluprikolice sa baterijskom nadgradnjom opremljenom sa posudama Tip–1



Slika P1.3. Sile i reakcije tla koje deluju na sastav tegljača i poluprikolice sa baterijskom nadgradnjom Tip – 1

(Izvor: vučno vozilo-tegljač: Iveco – technical drawings, priključno vozilo i nadgradnja: Autor)

Oznake na slici su: G_{uv} – ukupna težina vučnog vozila, G_{upp} – ukupna težina priključnog vozila, gi – težine gasnih kontejnera na priključnom vozilu, G_s – težina na sedlu tegljača od poluprikolice, $G\cos\alpha$ – komponenta težine vozila sa napadnom tačkom u težištu vozila normalna sa tlom, $G\sin\alpha = R_u$ – komponenta težine vozila paralelna sa tlom i sa napadnom tačkom u težištu vozila (otpor uspona), F_o – obimna sila na pogonskim točkovima, R_{fp} – otpor kotrljanja vođenih točkova vučnog vozila, R_{fz} – otpor kotrljanja pogonskih točkova vučnog vozila, R_v – otpor vazduha vučnog vozila, R'_{fpp} – otpor kotrljanja vođenih točkova priključnog vozila, l_1 – međuosovinsko rastojanje vučnog vozila, l_p, l_z, l'_p i l'_z – koordinate težišta vučnog vozila paralelne sa tlom, l – rastojanje od ose vučnog čepa do druge osovine priključnog vozila, l_2 i l_3 – međuosovinsko rastojanje priključnog vozila, l_{ts}, l_{to}, l'_{ts} i l'_{to} – koordinate težišta priključnog vozila paralelne sa tlom, Z_p – normalna reakcija tla na prvoj (upravljačkoj osovini tegljača), Z_z – normalna reakcija tla na drugoj (pogonskoj osovini tegljača), Z_s – normalna reakcija na sedlu, X_s – reakcija na sedlu paralelna sa tlom, Z_{zp} – normalna reakcija tla na drugoj osovini priključnog vozila, h_t – visina težišta vučnog vozila bez nadgradnje, h_{ut} – visina težišta vučnog vozila sa nadgradnjom, h_{tp} – visina težišta priključnog vozila bez nadgradnje, h_{utp} – visina težišta priključnog vozila sa nadgradnjom, h_v – visina metacentra, h_s – visina sedla, h_1, h_2 i h_3 – visina težišta gasnih kontejnara na priključnom vozilu, x_i – koordinate težišta gasnih kontejnara u odnosu na osu vučnog čepa priključog vozila.

Konstruktivno rešenje baterijske nadgradnje sa gasnim kontejnerima Tip–1, baterijsko vozilo, izvedeno je sa više zasebnih kontejnera koji su postavljeni na određenim rastojanjima od ose vučnog čepa. Navedeno rešenje, čelični kontejneri sa horizontalno postavljenim posudama pod pritiskom Tip–1, obezbeđuje koncentrisana opterećenja na određenim delovima tovarnog prostora poluprikolice, sa ciljem optimale raspodele opterećenja. U zavisnosti od položaja ugradnje kontejnera broj posuda Tip–1 se menja, manji broj posuda nalazi se u zoni ose vučnog čepa, a veći deo u zoni osovinskog bloka. Osnovni razlog preraspodele broja posuda su maseni parametri, konstrukcione karakteristike posude Tip–1 detaljno su opisane u Poglavlju 3. Veza između priključnog vozila i nadgradnje je nerazdvojiva i ostvaruje se preko vijčanih veza. Na osnovu Slike P1.3 Podređene su sile i reakcije tla koje deluju na sastav, tegljača i poluprikolice sa baterijskom nadgradnjom i posudama Tip–1. Sile su određene za uslove pravolinijskog kretanja konstantnom brzinom na usponu, uz pretpostavku da reakcije tla deluju podjednako na leve i desne točkove vozila.

Sile koje deluju u pravcu kretanja sastava, određene su izrazima:

$$\Sigma X_i = 0$$
$$F_o = \Sigma R_f + R_v + G_{uv} \times \sin\alpha + X_s \qquad [3.1]$$
$$F_o = \left(R_{f_v} + R_{f_p}\right) + R_v + G_{uv} \times \sin\alpha + X_s$$

- Posmatrajući samo prikolicu:

$$X_s = R'_v + \left(R'_{f_v} + R'_{f_v} + R'_{f_v}\right) + G_{upp} \times \sin\alpha$$
$$X_s = R'_v + \left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v + G_{3p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + G_{upp} \times \sin\alpha \qquad [3.2]$$

Težine vučnog i priključnog vozila:

- vučno vozilo (tegljač)

$$G_{uv} = G_v + G_s \qquad [3.3]$$

- priključno vozilo (poluprikolica)

$$G_{upp} = G_{pp} + G_{npp} = G_{pp} + g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 \quad [3.4]$$

Otpori kotrljanja vučnog i priključnog vozila:

- vučno vozilo (tegljač)

$$R_f = \left(G_{1v} \times f_v + G_{2v} \times f_p\right) \times \cos\alpha \quad [3.5]$$

- priključno vozilo (poluprikolica)

$$R'_f = \left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v + G_{3p} \times f_v\right) \times \cos\alpha \quad [3.6]$$

Otpor vazduha za vučno i priključno vozilo prikazan je izrazima [1.10] i [1.11].

Zamenom vrednosti izraza [3.3], [3.5] i [3.6] u izraz [3.1] sile koje deluju u pravcu kretanja skupa vozila prikazane su izrazom [3.7]:

$$F_o = \left(R_{f_v} + R_{f_p}\right) + 1{,}15 \times R_v + (G_v + Z_s) + \left(R'_{f_v} + R'_{f_v} + R'_{f_v}\right) + (G_{pp} + G_{npp}) \times \sin\alpha \quad [3.7]$$

Zamenom vrednosti prethodnih izraza u izraz [3.7] sile koje deluju u pravcu kretanja skupa vozila u razvijenom obliku prikazane su izrazom [3.8]:

$$\begin{aligned} F_o &= \left(G_{1v} \times f_v + G_{2v} \times f_p\right) \times \cos\alpha + (G_v + Z_s) \times \sin\alpha + \\ &+ 1{,}15 \times \left(\frac{c_x \times \rho}{2} \times A \times \left(V \pm V_v\right)^2\right) + \\ &+ \left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v + G_{3p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + (G_{pp} + g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5) \times \sin\alpha \end{aligned} \quad [3.8]$$

Sile koje deluju na sastav u pravcu normalnom na tlo:

$$\begin{aligned} &\Sigma Y_i = 0 \\ &G_{uv} \times \cos\alpha + G_{upp} \times \cos\alpha = Z_p + Z_z + Z_s + Z_{zp} \end{aligned} \quad [3.9]$$

Zamenom izraza [3.3] i [3.4] u izraz [3.9] sile koje deluju u pravcu normalnom na tlo u razvijenom obliku prikazane su izrazom [3.10]:

$$\left(G_v + G_s\right) \times \cos\alpha + \left(G_{pp} + g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5\right) \times \cos\alpha = Z_p + Z_z + Z_s + Z_{zp} \quad [3.10]$$

Na osnovu jednačine ravnoteže momenata svih sila u odnosu na tačku delovanja, vertikalne reakcije na zadnjim točkovima poluprikolice i osloncu sedla određena je izrazom [3.11], [3.13] i [3.13].

Suma momenata za tačku oslonca (C) za opterećenje u osloncu sedla poluprikolice:

$$\begin{aligned} &\Sigma M_C = 0 \\ &Z_s = \frac{G_{upp} \cos\alpha \times l'_{to} - G_{upp} \sin\alpha \times h_{utp} + X_s \times h_s}{l} \end{aligned} \quad [3.11]$$

Zamenom izraza [3.3], [3.4] u izraz [3.11] normalne reakcije u osloncu sedla u razvijenom obliku prikazane su izrazom [3.12]:

$$Z_s = \frac{(G_{pp} \times l_{to} + g_1 \times x_1 + g_2 \times x_2 + g_3 \times x_3 + g_4 \times x_4 + g_5 \times x_5) \times \cos\alpha}{l} -$$
$$- \frac{(G_{pp} \times h_{tp} + g_1 \times h_1 + g_2 \times h_2 + g_3 \times h_3 + g_4 \times h_3 + g_5 \times h_3) \times \sin\alpha}{l} + \quad [3.12]:$$
$$+ \frac{\left(\left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v + G_{3p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + (G_{pp} + g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5) \times \sin\alpha\right) \times h_s}{l}$$

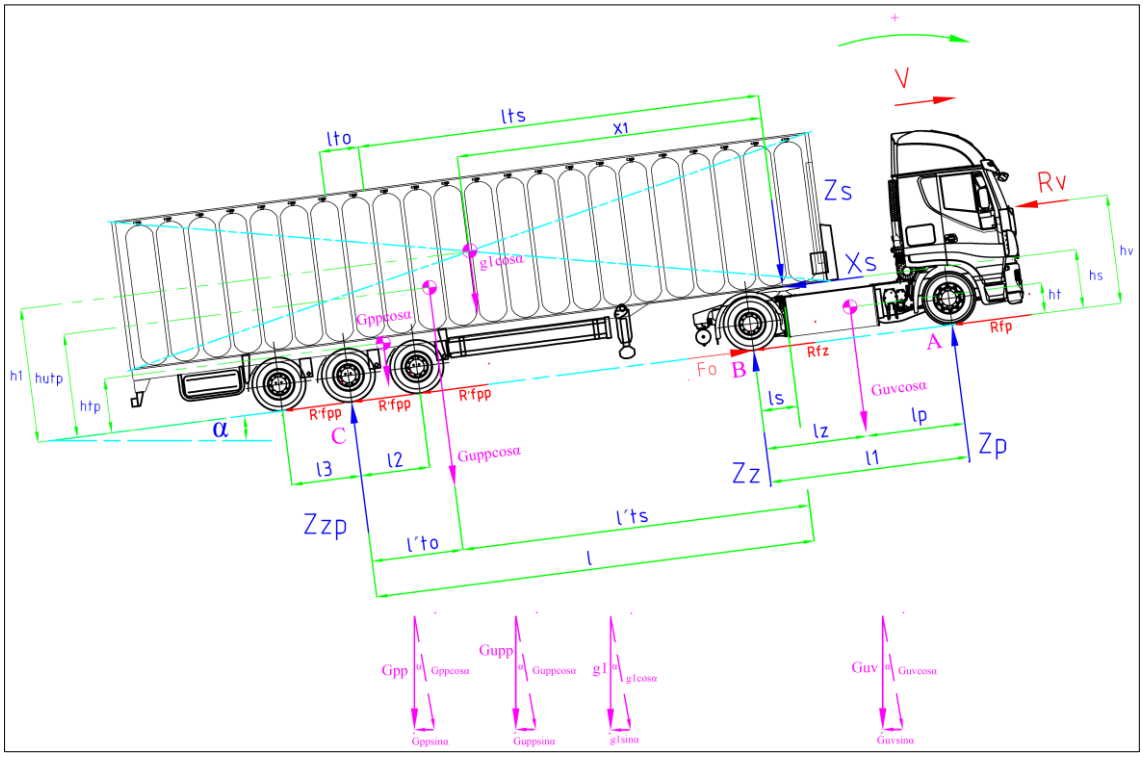
Suma momenata za tačku oslonca (A) prednjih točkova vučnog vozila (tegljača), normalne reakcije na zadnjoj osovini tegljača prikazane su izrazom [3.13]:

$$\Sigma M_A = 0$$
$$Z_z = \frac{G_{uv} \sin\alpha \times h_t + G_{uv} \cos\alpha \times l_p + X_s \times h_s + Z_s \times (l_1 - l_s) + R_v \times h_v}{l_1} \quad [3.13]$$

Suma momenata za tačku oslonca (B) zadnjih točkova vučnog vozila (tegljača), normalne reakcije na prednjoj osovini tegljača prikazane su izrazom [3.14]:

$$\Sigma M_B = 0$$
$$Z_p = \frac{G_{uv} \cos\alpha \times l_z - G_{uv} \sin\alpha \times h_t - X_s \times h_s - Z_s \times l_s + R_v \times h_v}{l_1} \quad [3.14]$$

Sile i reakcije tla koje deluju na sastav tegljača i poluprikolice sa MEGC nadgradnjom opremljenom sa posudama Tip–4



Slika 1.9. Sile i reakcije tla koje deluju na sastav tegljača i poluprikolice sa MEGC nadgradnjom Tip–4
(Izvor: vučno vozilo-tegljač: Iveco – technical drawings, priključno vozilo i nadgradnja: Autor)

Konstruktivno rešenje MEGC nadgradnje sa gasnim kontejnerima izvedeno je sa vertikalno postavljenim posudama pod pritiskom Tip–4 unutar čeličnog rama jednog kontejnera. Izvedeno rešenje obezbeđuje kontinualno opterećenje na tovarnom delu poluprikolice, a veza između poluprikolice i nadgradnje ostvaruje se preko sistema brava. Razlike u odnosu na baterijsku nadgradnju sa gasnim kontejnerima Tip–1 prikazane na Slici P1.4 odnose se na vrste opterećenja, posude Tip–4 detaljno su opisane u Poglavlju 3. Na osnovu Slike P1.4 određene su sile i reakcije tla koje deluju na sastav, tegljača i poluprikolice sa MEGC nadgradnjom i posudama Tip–4. Sile su određene za uslove pravolinijskog kretanja konstantnom brzinom na usponu, uz pretpostavku da reakcije tla deluju podjednako na leve i desne točkove vozila.

Sile koje deluju u pravcu kretanja sastava, određene su izrazima [4.1], [4.2], [4.3] i [4.4]:

$$\Sigma X_i = 0$$
$$F_o = \left(R_{f_v} + R_{f_p}\right) + R_v + G_{uv} \times \sin\alpha + X_s \qquad [4.1]$$

Posmatrajući samo prikolicu:

$$X_s = R'_v + \left(R'_{f_v} + R'_{f_v} + R'_{f_v}\right) + G_{upp} \times \sin\alpha$$
$$X_s = R'_v + \left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v + G_{3p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + G_{upp} \times \sin\alpha \qquad [4.2]$$

Težine vučnog i priključnog vozila:

- vučno vozilo (tegljač)

$$G_{uv} = G_v + G_s \qquad [4.3]$$

- priključno vozilo (poluprikolica)

$$G_{upp} = G_{pp} + G_{npp} = G_{pp} + g_1 \qquad [4.4]$$

Otpori kotrljanja vučnog i priključnog vozila prikazan je izrazima [1.9] i [1.10]:

Otpor vazduha za vučno i priključno vozilo prikazan je izrazima [1.11] i [1.12].

Zamenom vrednosti izraza [4.3], [4.4] u izraz [4.1] sile koje deluju u pravcu kretanja skupa vozila prikazane su izrazom [4.5]:

$$F_o = \left(R_{f_v} + R_{f_p}\right) + 1{,}15 \cdot R_v + (G_v + G_s) + \left(R'_{f_v} + R'_{f_v} + R'_{f_v}\right) + (G_{pp} + G_{npp}) \times \sin\alpha \qquad [4.5]$$

Zamenom vrednosti prethodnih izraza u izraz [4.5] sile koje deluju u pravcu kretanja skupa vozila u razvijenom obliku prikazane su izrazom [4.6]:

$$F_o = \left(G_{1v} \times f_v + G_{2v} \times f_p\right) \times \cos\alpha + (G_v + G_s) \times \sin\alpha +$$
$$+1{,}15 \times \left(\frac{c_x \times \rho}{2} \times A \times \left(V \pm V_v\right)^2\right) + \qquad [4.6]$$
$$+\left(G_{1p} \times f_v + G_{2p} \times f_v + G_{3p} \times f_v\right) \times \cos\alpha + (G_{pp} + g_1) \times \sin\alpha$$

Sile koje deluju na sastav u pravcu normalnom na tlo:

$$\Sigma Y_i = 0$$
$$G_{uv} \times \cos\alpha + G_{upp} \times \cos\alpha = Z_p + Z_z + Z_s + Z_{zp} \quad [4.7]$$

Zamenom izraza [4.3] i [4.4] u izraz [4.7] sile koje deluju u pravcu normalnom na tlo u razvijenom obliku prikazane su izrazom [4.8]:

$$\left(G_v + G_s\right) \times \cos\alpha + \left(G_{pp} + g_1\right) \times \cos\alpha = Z_p + Z_z + Z_s + Z_{zp} \quad [4.8]$$

Na osnovu jednačine ravnoteže momenata svih sila u odnosu na tačku delovanja, normalna reakcija oslonca sedla određena je izrazom [4.9].

- Suma momenata za tačku oslonca (C) za opterećenje u osloncu sedla poluprikolice:

$$\Sigma M_C = 0$$
$$Z_s = \frac{G_{upp} \cos\alpha \cdot l'_{to} - G_{upp} \sin\alpha \cdot h_{utp} + X_s \cdot h_s}{l} \quad [4.9]$$

Zamenom izraza [4.2], [3.3] i [4.4] u izraz [4.9] normalne reakcije u osloncu sedla u razvijenom obliku prikazane su izrazom [4.10]:

$$Z_s = \frac{(G_{pp} \cdot l_{to} + g_1 \cdot x_1) \cdot \cos\alpha}{l} - \frac{(G_{pp} \cdot h_{tp} + g_1 \cdot h_1) \cdot \sin\alpha}{l} + \frac{\left(\left(G_{1p} \cdot f_v + G_{2p} \cdot f_v + G_{3p} \cdot f_v\right) \cdot \cos\alpha + (G_{pp} + g_1) \cdot \sin\alpha\right) \cdot h_s}{l} \quad [4.10]$$

- Suma momenata za tačku oslonca (A) prednjih točkova vučnog vozila (tegljača), normalne reakcije na zadnjoj osovini prikazane su izrazom [4.11]:

$$\Sigma M_A = 0$$
$$Z_z = \frac{G_{uv} \sin\alpha \times h_t + G_{uv} \cos\alpha \times l_p + X_s \times h_s + Z_s \times (l_1 - l_s) + R_v \times h_v}{l_1} \quad [4.11]$$

Suma momenata za tačku oslonca (B) zadnjih točkova vučnog vozila (tegljača), normalne reakcije na prednjoj osovini prikazane su izrazom [4.12]:

$$\Sigma M_B = 0$$
$$Z_p = \frac{G_{uv} \cos\alpha \times l_z - G_{uv} \sin\alpha \times h_t - X_s \times h_s - Z_s \times l_s + R_v \times h_v}{l_1} \quad [4.12]$$

Podaci o putnoj mreži

Razmatrana trasa deo je putne mreže Republike Srbije: https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/referentni-sistem/Karta_drzavnih_puteva.pdf

PRILOG 2

Regresioni koeficijenti

U okviru ovog priloga dat je Excel VBA kod za povezivanje podataka o nagibu deonice sa metodom određivanja potrošnje goriva primenom podataka iz brzinske karakteristike motora, saobraćajnim i specifičnim uslovima eksploatacije, putem regresionih koeficijenata. Kod je namenjen za povezivanje podataka o nagibu deonice i dozvoljenoj brzini kretanja na deonicama trase primenom aplikacije S Projekt–GIS Portal i preuzetih iz nacionalne baze podataka, sa metodom određivanja potrošnje goriva primenom podataka iz brzinske karakteristike motora.

Excel VBA kod:

```
RegresionaAnaliza
Dim ws As Worksheet
Dim startRow As Long, endRow As Long
Dim currentStart As Long, currentEnd As Long
Dim resultRow As Long
Dim koefB () As Variant, koefC () As Variant
Dim rangeYB As Range, rangeYC As Range, rangeX As Range

' Postavi radni list
Set ws = ThisWorkbook.Sheets ("Sheet3")

' Početni i krajnji redovi podataka
startRow = 4
endRow = 28863

' Početni red za rezultate
resultRow = 4

' Iteracija kroz opsege od 4 do 66 pa do kraja
currentStart = startRow
currentEnd = startRow + 64

Do While currentStart < = endRow
' Osiguranje da currentEnd ne prelazi endRow
If currentEnd > endRow Then
currentEnd = endRow
End If

' Definiši opsege za trenutnu iteraciju
Set rangeYB = ws.Range("B" & currentStart & ":B" & currentEnd)
Set rangeYC = ws.Range("C" & currentStart & ":C" & currentEnd)
Set rangeX = ws.Range("D" & currentStart & ":E" & currentEnd)

' Provera za prazne ili nevažeće ćelije
If WorksheetFunction.Count(rangeYB) < rangeYB.Rows.Count Or _
WorksheetFunction.Count(rangeYC) < rangeYC.Rows.Count Or _
WorksheetFunction.Count(rangeX) < rangeX.Rows.Count * 2 Then
MsgBox "Prazne ili nevažeće ćelije u opsegu od reda " & currentStart & " do reda " & currentEnd,
vbExclamation
GoTo SkipIteration
End If
```

```
' Izračunavanja regresionih koeficijenata za potrošnju B
On Error Resume Next
koefB = Application.LinEst(rangeYB.Value, rangeX.Value, True, False)
If Err.Number <> 0 Then
MsgBox "Greška u izračunavanju regresionih koeficijenata za potrošnju B u opsegu " & currentStart
& " - " & currentEnd, vbCritical
Err. Clear
GoTo SkipIteration
End If
On Error GoTo 0

' Iračunavanja regresionih koeficijenata za potrošnju C
On Error Resume Next
koefC = Application.LinEst(rangeYC.Value, rangeX.Value, True, False)
If Err.Number <> 0 Then
MsgBox "Greška u izračunavanju regresionih koeficijenata za potrošnju C u opsegu " & currentStart
& " - " & currentEnd, vbCritical
Err. Clear
GoTo SkipIteration
End If
On Error GoTo 0
' Smeštanje rezultata u kolone I do N
ws.Cells(resultRow, 9).Value = koefB(1) ' a (kolona I)
ws.Cells(resultRow, 10).Value = koefB(2) ' b (kolona J)
ws.Cells(resultRow, 11).Value = koefB(3) ' c (kolona K)

ws.Cells(resultRow, 12).Value = koefC(1) ' a (kolona L)
ws.Cells(resultRow, 13).Value = koefC(2) ' b (kolona M)
ws.Cells(resultRow, 14).Value = koefC(3) ' c (kolona N)

SkipIteration:
' Ažuriraj opsege i red za rezultate
currentStart = currentEnd + 1
currentEnd = currentStart + 64
resultRow = resultRow + 1
Loop

MsgBox "Regresioni koeficijenti su uspešno izračunati i uneseni u Sheet3!"
End Sub
```

PRILOG 3

Faktor kompresibilnosti najčešćih tehničkih gasova

Tabela P3.1. Faktor kompresibilnosti (faktor realnog gasa) $Z_{P,T}$

Metan (CH_4)										
	t = 0 °C		t = 10 °C		t = 20 °C		t = 30 °C		t = 50 °C	
p_r [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]
190	0,7516	252,790	0,7812	243,230	0,8086	234,970	0,8336	227,920	0,8765	216,770
200	0,7589	263,640	0,7866	254,250	0,8130	246,010	0,8373	238,860	0,8795	227,410
210	0,7670	273,800	0,7934	264,700	0,8186	256,550	0,8420	249,390	0,8833	237,750
220	0,7765	283,320	0,8012	274,580	0,8252	266,610	0,8478	259,510	0,8879	247,770
230	0,7870	292,250	0,8101	283,920	0,8327	276,190	0,8544	269,210	0,8932	257,490
240	0,7984	300,620	0,8198	292,740	0,8412	285,320	0,8617	278,510	0,8993	266,880
250	0,8104	308,480	0,8303	301,090	0,8503	294,000	0,8699	287,400	0,9059	275,960
Argon (Ar)										
	t = 26,85 °C		t = 76,85 °C		t = 126,85 °C		t = 176,85 °C		t = 226,85 °C	
p_r [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]
100	0,956	104,615	0,988	101,187	1,006	99,430	1,016	98,467	1,021	97,921
120	0,951	126,124	0,989	121,340	1,009	118,940	1,020	117,636	1,026	116,902
150	0,949	158,101	0,992	151,216	1,015	147,793	1,028	145,952	1,035	144,928
200	0,954	209,700	1,002	199,559	1,028	194,510	1,043	191,818	1,051	190,352
250	0,970	257,754	1,019	245,419	1,045	239,149	1,060	235,819	1,068	234,047
300	0,996	301,322	1,041	288,276	1,066	281,425	1,080	277,792	1,087	275,920
350	1,029	340,210	1,067	327,907	1,090	321,190	1,102	317,652	1,108	315,927
Azot (N_2)										
	t = 26,85 °C		t = 76,85 °C		t = 126,85 °C		t = 176,85 °C		t = 226,85 °C	
p_r [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]
100	1,005	99,482	1,027	97,380	1,038	96,385	1,043	95,915	1,045	95,716
120	1,012	118,574	1,036	115,855	1,047	114,585	1,053	114,000	1,055	113,768
150	1,026	146,241	1,051	142,711	1,063	141,092	1,069	140,380	1,070	140,137
200	1,057	189,246	1,081	184,942	1,093	183,038	1,097	182,306	1,098	182,185
250	1,097	227,978	1,117	223,825	1,126	222,122	1,128	221,670	1,127	221,880
300	1,143	262,478	1,157	259,372	1,161	258,378	1,160	258,528	1,157	259,292
350	1,194	293,111	1,200	291,796	1,199	291,937	1,195	292,992	1,188	294,525
Ugljen-dioksid (CO_2)										
	t = 20 °C		t = 30 °C		t = 40 °C		t = 50 °C		t = 60 °C	
p_r [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]
80	0,174	459,003	0,200	400,860	0,481	166,434	0,597	134,054	0,664	120,515
90	0,193	467,479	0,211	425,945	0,314	286,387	0,513	175,533	0,607	148,366
100	0,211	474,708	0,226	441,795	0,271	368,354	0,420	238,038	0,545	183,565
200	0,385	519,326	0,392	510,355	0,402	497,058	0,418	478,768	0,439	455,165
300	0,550	545,704	0,552	543,298	0,557	538,651	0,564	531,677	0,574	522,367
400	0,708	565,263	0,706	566,412	0,707	566,000	0,709	564,020	0,714	560,500
Kiseonik (O_2)										
	t = 26,85 °C		t = 76,85 °C		t = 126,85 °C		t = 176,85 °C		t = 226,85 °C	
p_r [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]
100	0,953	104,902	0,987	101,267	1,006	99,430	1,016	98,425	1,022	97,855
120	0,949	126,497	0,988	121,467	1,009	118,952	1,021	117,587	1,027	116,817
150	0,945	158,695	0,991	151,429	1,015	147,831	1,028	145,894	1,036	144,814
200	0,949	210,727	1,000	199,949	1,028	194,605	1,043	191,750	1,052	190,183
250	0,964	259,248	1,046	246,006	1,045	239,310	1,060	235,740	1,069	233,815
300	0,989	303,273	1,038	289,073	1,065	281,654	1,080	277,695	1,088	275,611
350	1,022	342,583	1,064	328,916	1,089	321,488	1,102	317,528	1,109	315,525
Vodonik (H_2)										
	t = 0 °C		t = 10 °C		t = 20 °C		t = 30 °C		t = 50 °C	
p_r [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]	$Z_{p,T}$	p_i [bar]
200	1,132	176,67	1,128	177,18	1,125	177,68	1,122	178,16	1,117	179,06
210	1,139	184,37	1,135	184,94	1,132	185,49	1,129	186,01	1,123	187,00
220	1,146	191,97	1,142	192,60	1,138	193,20	1,135	193,78	1,129	194,86
230	1,153	199,48	1,149	200,17	1,145	200,82	1,141	201,45	1,135	202,63
240	1,160	206,90	1,155	207,64	1,151	208,36	1,148	209,04	1,141	210,32
250	1,167	214,22	1,162	215,03	1,158	215,80	1,154	216,54	1,147	217,92

Izvor:
[1] Sadžaković i ostali. (2015). Priručnik za gasnu tehniku.

BIOGRAFIJA AUTORA

Dragan Vašalić rođen je 11.10.1989. godine u Drvaru, u Federaciji Bosne i Hercegovine. Nakon prestanka postojanja Socijalističke Federativne Republike Jugoslavije, sa porodicom se preselio u Beograd, Republiku Srbiju, gde završava osnovnu i srednju školu. Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu upisao je školske 2009/2010. godine. Osnovne akademske studije završio je školske 2013/2014. godine. Master rad na temu „Funkcionalna bezbednost putničkih vozila“, odbranio je sa ocenom 10 (deset), pod mentorstvom dr Vladimira Popovića, redovnog profesora Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu 2016. godine. Doktorske akademske studije na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisao je školske 2018/2019. godine. Položio je sve ispite sa prosečnom ocenom 10 (deset) i predao godišnji rad.

Tokom studiranja, od 2015. godine, zasnovao je radni odnos u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“ u Centru za motore i vozila i Kontrolnom telu. Njegovo radno angažovanje bilo je usmereno na kontrolisanje motornih i priključnih vozila, kao i na kontrolisanje posuda, vozila–cisterni i kola–cisterni namenjenih za drumski i železnički transport opasne robe. Radi unapređenja stručnih kompetencija u oblasti transporta opasne robe, od 2016. godine se intenzivno usavršavao u oblasti zavarivanja u Zavodu za zavarivanje, Institut de Soudure–Welding Institute. Navedeni program uspešno je završio 2017. godine i stekao zvanje međunarodnog inženjera zavarivanja (IWE). Od juna 2021. godine, rešenjem Ministarstva građevinarstva, telekomunikacija i saobraćaja, Sektora za vazdušni saobraćaj i transport opasne robe, ovlašćen je kao stručno lice za kontrolisanje i ispitivanje cisterni, baterijskih vozila i MEGC nadgradnji namenjenih za transport opasne robe. U okviru radnog angažovanja učestvovao je u postupcima odobrenja tipa cisterni namenjenih drumskom transportu opasne robe, u skladu sa dobijenim ovlašćenjima, važećim zakonskim propisima i tehničkim zahtevima.

Od 2022. godine učestvuje u programu istraživanja pod nazivom „Istraživanje i razvoj alternativnih pogonskih sistema za komunalna vozila radi poboljšanja energetske efikasnosti i ekoloških karakteristika“. Od 2024. godine učestvuje i u programu istraživanja pod nazivom „Razvoj radijacionih tehnologija, novih inteligentnih polimernih materijala i naprednih metoda obrade eksperimentalnih podataka za primene u medicini, elektronici i zaštiti životne sredine“, koji se realizuje u Institutu. Rad na navedenim istraživačkim temama doprineo je daljem usavršavanju u oblasti primene polimernih i kompozitnih materijala u privredi, sa posebnim osvrtom na drumski transport, uključujući i drumski transport opasne robe. Tokom dosadašnjeg radnog angažovanja i naučnoistraživačkog rada bio je autor i koautor više naučnih i stručnih publikacija objavljenih u časopisima međunarodnog i nacionalnog značaja.

IZJAVA O AUTORSTVU

Ime i prezime autora: Dragan Vašalić

Broj indeksa: 4–DS–18D017

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

MODELI ZA PODRŠKU IZBORU VOZILA I NADGRADNJI ZA TRANSPORT PRIRODNOG GASA U KOMPRIMOVANOM STANJU

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, Potpis autora

_____ _____

IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA

Ime i prezime autora: Dragan Vašalić

Broj indeksa: 4–DS–18D017

Studijski program: Saobraćaj

Naslov rada: MODELI ZA PODRŠKU IZBORU VOZILA I NADGRADNJI ZA TRANSPORT PRIRODNOG GASA U KOMPRIMOVANOM STANJU

Mentor: dr Ivan Ivković, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao radi pohranjivanja u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, Potpis autora

_____ _____

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

MODELI ZA PODRŠKU IZBORU VOZILA I NADGRADNJI ZA TRANSPORT PRIRODNOG GASA U KOMPRIMOVANOM STANJU

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilozima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.
Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

U Beogradu, Potpis autora

_____ _____

1. **Autorstvo**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. **Autorstvo – nekomercijalno**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. **Autorstvo – bez prerada**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima**. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.