



Sveučilište u Rijeci
University of Rijeka
<http://www.uniri.hr>

Polytechnica: Journal of Technology Education, Volume 6, Number 1 (2022)
Politehnika: Časopis za tehnički odgoj i obrazovanje, Volumen 6, Broj 1 (2022)



Politehnika
Polytechnica
<http://www.politehnika.uniri.hr>
cte@uniri.hr

DOI: <https://doi.org/10.36978/cte.6.1.4>

Stručni članak
Professional paper
UDK: 629:502.17
502.17:629

Simulacija potrošnje goriva i emisija automobila s različitim pogonom

Tomislav Senčić, Bruno Bojković, Tomislav Mrakovčić

Tehnički fakultet

Sveučilište u Rijeci

Vukovarska 58, 51000 Rijeka

tsencic@riteh.hr, bbojkovic3@gmail.com, tomislav.mrakovcic@riteh.hr

Sažetak

Potrošnja goriva i emisije štetnih plinova imaju vrlo veliki utjecaj na okoliš, a ovise o vrsti pogona vozila, konfiguraciji terena, opterećenju vozila te brzini gibanja vozila. U ovom radu provedena je simulacija potrošnje goriva i emisija štetnih tvari pomoću računalne aplikacije Advisor za automobil na određenoj dionici. Pomoću tvornički ugrađenih senzora i upravljačke jedinice motora automobila te putem OBD2 priključka, izmjerena je trenutna brzina i potrošnja goriva automobila s dizelskim motorom na dinamičnoj gradskoj dionici. Zatim su izrađeni simulacijski modeli automobila s dizelskim, benzinskim i hibridnim pogonom. Izmjereni profil brzine stvarnog automobila upotrijebljen je kao ulazni podatak u simulacijama za automobile s različitim pogonima. Usporedba rezultata dobivenih simulacijom i vrijednosti dobivenih mjerenjem na stvarnom automobilu s dizelskim pogonom poslužila je za validaciju simulacijskog modela. Pomoću računalne aplikacije Advisor izračunate su potrošnje goriva, emisije ugljikovog dioksida, neizgorenih ugljikovodika, ugljikovog monoksida te dušikovih oksida. Dobiveni rezultati su očekivani, iako su zbog dinamičnosti dionice razlike između pojedinih izvedbi pogona naglašenije nego što to sugeriraju podaci deklarirani od strane proizvođača. Najveću potrošnju goriva i najvišu emisiju štetnih tvari ima automobil s benzinskim pogonom, a najmanju automobil s hibridnim pogonom. Vrlo velik utjecaj na emisije izračunate pomoću simulacijskog modela ima činjenica da katalizator trostrukog djelovanja ugrađen u automobil s benzinskim i hibridnim pogonom postaje djelotvoran tek nakon nekog vremena od hladnog starta, odnosno nakon što se postigne odgovarajuća radna temperatura motora.

Ključne riječi: potrošnja goriva; emisije štetnih plinova; Advisor simulacija vozila.

1 Uvod

Energija dobivena pretvorbom iz primarne energije fosilnih goriva je u proteklim stoljećima promijenila svijet. Mehanički rad i električna energija dobiveni pomoću toplinskih strojeva omogućuju značajan porast životnog standarda ljudi. Motori ugrađeni u prijevozna sredstva omogućuju relativno jeftin transport dobara i ljudi. Ipak, nakon određenog

vremena, pokazale su se i brojne negativne strane masovne eksploatacije i uporabe fosilnih goriva. Dolazi do postepenog iscrpljenja pojedinih nalazišta fosilnih goriva što dovodi do stalnog porasta cijena energije. Kako je energija uključena u sve ljudske djelatnosti i proizvode, slijedi porast svih cijena. To ima za posljedicu generiranje socijalnog pritiska na siromašnije slojeve i povećanje razlika u standardu između onih koji imaju pristup nalazištima fosilnih

goriva i onih koji nemaju. Ovaj društveni fenomen je često u pozadini društvenih nemira, migracija stanovništva pa čak i oružanih sukoba. S druge strane, izgaranje fosilnih goriva uzrokuje emisije stakleničkih plinova što za posljedicu ima porast globalne temperature i pogubne klimatske promjene s čitavim nizom posljedica po ljude ("United Nations Climate Change Conference", 2021). Osim stakleničkih plinova, posebno u urbanim središtima problem predstavlja i emisija štetnih plinova i čestica koje imaju direktno negativno djelovanje na zdravlje ljudi. Ovaj problem je naročito osviješten 2015. godine zbog "Dieselgate" afere ("Volkswagen emission scandal", 2022). Zbog masovnog transporta i prerade fosilnih goriva može doći do havarija kao što su izlivanje sirove nafte, požari ili eksplozije u rafinerijama nafte te potonuće ili nasukavanje tankera. Ovo su u najkraćim crtama razlozi zbog kojih se nastoji smanjiti potrošnja i uporaba fosilnih goriva. Posljednjih godina, u cestovnom prometu prisutan je izraziti trend prelaska na električni pogon (Zhanga, Lia, Wu, 2017.). Ipak, ova tranzicija je vrlo spora zbog tehničkih problema koji prate ovu vrstu pogona. Tehnološki gledano, ograničavajući faktor za širu primjenu vozila na električni pogon je pohrana energije, odnosno baterije. Baterije još uvijek karakterizira malen specifični kapacitet po jedinici mase, visoka cijena, sporo punjenje i nedostatak infrastrukture za punjenje (Falchetta, Noussan, 2021.). Osim električnih vozila, provode se intenzivna ispitivanja i razvoj motora na druga goriva, kao što su primjerice naftni i prirodni plin te obnovljive vrste goriva poput bioetanola, biodizela, amonijaka ili vodika (Thomas, 2009). Zato je većina stanovništva još uvijek vezana uz uporabu motora s unutarnjim izgaranjem fosilnih goriva. Kako bi se njihova štetnost čim više ublažila, zakonodavstvo diktira ograničenja emisija štetnih tvari (European emission standards), a proizvođači i znanstvenici nastoje poboljšati njihove performanse, smanjiti potrošnju i razviti sustave koji neutraliziraju štetne emisije. U periodu do značajnijeg poboljšanja karakteristika baterija u električnim vozilima, jedan važan korak je razvoj hibridnih pogona. Vozila s hibridnim pogonom imaju ugrađen motor s unutarnjim izgaranjem i elektromotor, što omogućuje iskorištavanje najboljih odlika oba pogonska stroja.

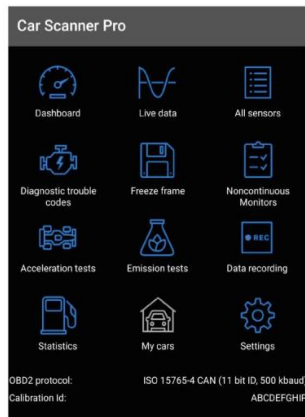
Cilj ovoga rada je usporediti potrošnju goriva i emisija štetnih plinova automobila s različitim pogonima: dizelskim, benzinskim i hibridnim. U svrhu dobivanja profila brzine u realnom prometu na gradskoj dionici te u svrhu validacije simulacije, provedeno je precizno mjerenje brzine i potrošnje goriva na određenoj dionici. Zatim je izrađen simulacijski model analiziranog vozila te je na istoj dionici uspoređena potrošnja goriva benzinskog,

hibridnog i dizelskog vozila. Računalna aplikacija omogućuje i proračun emisije štetnih tvari, pa je provedena i analiza emisija štetnih tvari. Također je izračunata i emisija ugljikovog dioksida.

2 Mjerenje i validacija simulacije

Pogonski sustav automobila u gradskom prometu izložen je vrlo dinamičnom režimu rada pri čemu se u relativno kratkom vremenskom periodu izmjenjuju ubrzanja i usporavanja te zaustavljanja i ponovna kretanja vozila. Potrošnja goriva i tvorba štetnih produkata u takvom režimu je znatno viša nego u stacionarnom režimu u kakvom rade primjerice brodski motori, motori zrakoplova ili motori u cestovnim vozilima na otvorenoj cesti. To je ujedno i režim vožnje u kojem najviše dolaze do izražaja prednosti hibridnog pogona (Gonder, 2008.). Zbog toga je za vjerodostojnu analizu potrošnje goriva i emisija štetnih tvari ključno raspolagati što točnijim podacima o brzini vozila tijekom vožnje. U tu svrhu provedeno je mjerenje na stvarnom automobilu u gradskom prometu (Bojković, 2021). Ovako dobiveni profil brzine vozila unosi se u računalnu aplikaciju te se izračunava potrošnja goriva i emisija štetnih tvari. Potrošnja goriva dobivena mjerenjem koristi se za provjeru točnosti rezultata dobivenih simulacijom, te validaciju i kalibraciju simulacijskog modela.

Za mjerenje stvarnih parametara vozila, uključujući trenutnu brzinu i potrošnju goriva, korištena je aplikacija za mobitel „Car Scanner ELM OBD2” koja je dostupna za preuzimanje s interneta. Sučelje aplikacije prikazano je na Slici 1. Aplikacije ovoga tipa, tzv. skeneri, predstavljaju alat za dijagnostiku motora i drugih sustava automobila, očitavanje performansi automobila i podataka iz putnog računala te pri tome koriste OBD2 Wi-Fi ili Bluetooth adapter za povezivanje s OBD2 sustavom automobila. Uz navedeno, skener pruža mogućnost prikaza podataka sa senzora motora ili drugih sustava u vozilu te prikaz i mogućnost poništavanja pogrešaka detektiranih tijekom rada motora (DTC - Diagnostic Trouble Codes). Skener se može koristiti i kao putno računalo te može prikazati trendove potrošnje goriva i promjene brzine vozila, što se za ovaj rad pokazalo kao najvažnija opcija. Za rad aplikacije za mobitel potreban je Wi-Fi ili Bluetooth 4.0 OBD2 ELM327 kompatibilni uređaj. Uređaj ELM327, Slika 2., priključuje se u OBD2 dijagnostičku utičnicu automobila i omogućuje mobilnom telefonu pristup dijagnostičkom sustavu automobila. Spomenuti uređaj radi s bilo kojim vozilom koje koristi OBD2 standard što uključuje većinu vozila proizvedenih nakon 2000. godine.



Slika 1. Sučelje aplikacije za mobilni Car Scanner ELM OBD2



Slika 2. ELM 327 Uređaj koji se priključuje u OBD2 priključak

Tijekom vožnje na odabranoj dionici praćeno je više parametara od kojih su za potrebe ovoga rada najvažniji oni vezani uz potrošnju goriva i brzinu vozila. Vožnja testnom dionicom i mjerenje parametara trajalo je ukupno 2 sata i 6 minuta te je u tom vremenu pređena udaljenost od 181 kilometra. Vozilo na kojemu je provedeno spomenuto mjerenje je Ford Focus 1,6 TDCi proizveden 2005. godine, a parametri koji su mjereni su: prosječna potrošnja goriva (l/100 km), prosječna brzina (km/h), trenutna potrošnja goriva (l/100 km), protok goriva (l/h), prijeđena udaljenost (km), utrošeno gorivo (l), ubrzanje vozila (g), trenutna brzina vozila (km/h) i trenutna snaga motora (kW).

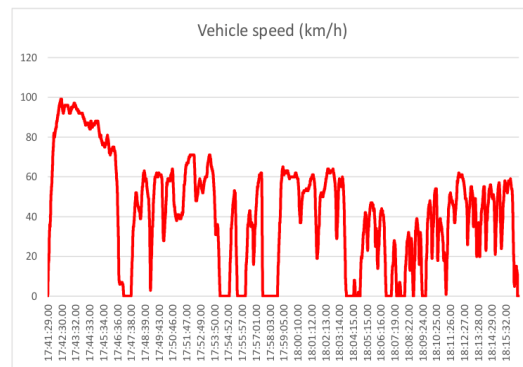
Nakon završetka testne vožnje, u aplikaciji treba odabrati opciju pohrane podataka snimanih tijekom vožnje. Nakon toga se odabire format zapisa podatka. Za potrebe ovoga rada odabran je Comma Separated Values format, što je bilo najprikladnije za naknadnu obradu podataka. Budući da aplikacija u prosjeku provede oko 10 mjerenja u sekundi, dobivena je tablica s preko 76000 redaka. Na slici 3. prikazan je početni dio tablice izmjerenih vrijednosti. Na slici je u prvom stupcu vidljivo vrijeme u trenutku snimanja, dok su u drugim stupcima mjereni parametri odabrani prilikom spremanja datoteke. Podaci su prebačeni u tablični kalkulator, pomoću kojega je moguće grafički prikazati očitane vrijednosti.

Poznato je da je pri ustaljenoj vožnji karakteristično za autocestu dizelski pogon učinkovitiji, a prednosti hibridnog pogona dolaze do izražaja kod dinamične vožnje koja je uobičajena u

gradskom prometu. Zato je za usporedbu rezultata dobivenih simulacijama odabrana dionica od naplatnih postaja Lučko do Čučerja u Zagrebu. Na ovoj je dionici dinamika vožnje razvijenija i uključuje više kočenja te zaustavljanja i kretanja. Također uključuje i uspon te se može smatrati kao prijelazni režim vožnje između uvjeta na autocesti i u gradu. U dijagramu na slici 4. prikazan je profil brzina na relaciji Lučko – Čučerje.

| time | Average fuel consumption (l/100km) | Average speed (km/h) | Calculated instant fuel consumption (L/100km) | Calculated instant fuel rate (L/h) | Distance travelled (km) | Fuel used (l) | Vehicle acceleration (g) | Vehicle speed (km/h) |
|------------|------------------------------------|----------------------|---|------------------------------------|-------------------------|---------------|--------------------------|----------------------|
| 4:10:25 PM | 43.76509657 | 0.022977715 | 127.988878 | 1.32737557 | 0.00029981 | 0.000331 | 0.000982063 | 1 |
| 4:10:26 PM | 1531.2511 | 0.06422743 | 132.2737557 | 1.304615885 | 0.00090867 | 0.00139 | 0.0476316 | 2 |
| 4:10:26 PM | 497.1537235 | 0.105158565 | 65.23078923 | 1.285067873 | 0.00148254 | 0.00143 | 0.097293377 | 3 |
| 4:10:26 PM | 748.817864 | 0.128100781 | 44.51381842 | 1.294096002 | 0.001346414 | 0.00148 | 0.102118026 | 4 |
| 4:10:26 PM | 630.1178006 | 0.161113836 | 63.24547511 | 1.264073988 | 0.000235392 | 0.00148 | 0.090862439 | 5 |
| 4:10:26 PM | 545.5096739 | 0.186628218 | 63.20561991 | 1.239899729 | 0.00076564 | 0.00151 | 0.084740087 | 6 |
| 4:10:26 PM | 452.081885 | 0.221598856 | 41.98518128 | 1.066979735 | 0.00038861 | 0.00155 | 0.063055754 | 7 |
| 4:10:26 PM | 387.2073496 | 0.262895464 | 35.02262443 | 0.932013575 | 0.00040002 | 0.00155 | 0.099712941 | 8 |
| 4:10:26 PM | 270.9747712 | 0.374936111 | 31.26711916 | 0.978004215 | 0.000936537 | 0.00161 | 0.062032453 | 9 |
| 4:10:26 PM | 239.4212588 | 0.423895093 | 32.45348416 | 0.963800905 | 0.000889607 | 0.00164 | 0.057658154 | 10 |
| 4:10:27 PM | 232.9425256 | 0.498060003 | 32.13690483 | 0.988995776 | 0.000748313 | 0.00166 | 0 | 11 |
| 4:10:27 PM | 192.4060213 | 0.517082883 | 32.86651584 | 0.996909095 | 0.000888443 | 0.00171 | 0 | 12 |
| 4:10:27 PM | 148.722426 | 0.680389503 | 24.92477376 | 0.963873503 | 0.001198813 | 0.00178 | 0.044822842 | 13 |
| 4:10:27 PM | 128.8786497 | 0.78879972 | 24.07813268 | 1.00048914 | 0.001333323 | 0.00186 | 0.063615648 | 14 |
| 4:10:27 PM | 114.7297942 | 0.883787281 | 25.08937285 | 1.013020262 | 0.001859354 | 0.0019 | 0.052999184 | 15 |
| 4:10:28 PM | 102.2734278 | 0.991461714 | 25.23550905 | 1.078800905 | 0.001923149 | 0.00197 | 0.030240254 | 16 |
| 4:10:28 PM | 89.5575708 | 1.021831838 | 26.87002162 | 1.427873503 | 0.00211157 | 0.002 | 0 | 17 |
| 4:10:28 PM | 90.15288098 | 1.020406978 | 39.0668328 | 1.568397395 | 0.002094902 | 0.00203 | 0 | 18 |
| 4:10:28 PM | 94.68305942 | 1.088158308 | 39.08992113 | 1.574888888 | 0.002187884 | 0.00207 | 0 | 19 |
| 4:10:28 PM | 90.81560688 | 1.128381897 | 31.44977376 | 1.571640271 | 0.002291799 | 0.0021 | 0.002052889 | 20 |
| 4:10:28 PM | 88.8477354 | 1.172090927 | 31.03785423 | 1.690238564 | 0.002406413 | 0.00214 | 0.088925004 | 21 |
| 4:10:28 PM | 86.9389911 | 1.210920271 | 35.80958109 | 1.849212387 | 0.002521255 | 0.00218 | 0.089200728 | 22 |
| 4:10:28 PM | 85.1733877 | 1.247486837 | 38.38641334 | 2.091628959 | 0.002614416 | 0.00223 | 0.092227518 | 23 |
| 4:10:28 PM | 83.4984722 | 1.284517537 | 41.8237919 | 2.073399605 | 0.002718987 | 0.00227 | 0 | 24 |
| 4:10:28 PM | 81.1311923 | 1.326926994 | 35.93959109 | 2.12444389 | 0.002839997 | 0.00232 | 0.092117892 | 25 |
| 4:10:28 PM | 79.23940096 | 1.380763895 | 35.37390649 | 2.201440271 | 0.002884841 | 0.00237 | 0.092094611 | 26 |
| 4:10:29 PM | 77.62000636 | 1.424620254 | 36.6940452 | 2.21958824 | 0.003107751 | 0.00241 | 0.091830715 | 27 |
| 4:10:29 PM | 76.85891756 | 1.47471171 | 36.86247096 | 2.28117647 | 0.003151929 | 0.00247 | 0.089573925 | 28 |
| 4:10:29 PM | 74.00603002 | 1.528302126 | 32.77810924 | 2.299381379 | 0.003398817 | 0.00251 | 0.091278257 | 29 |
| 4:10:29 PM | 72.2570312 | 1.578063875 | 32.84760827 | 2.316651584 | 0.003449794 | 0.00256 | 0.090130338 | 30 |
| 4:10:29 PM | 70.28619316 | 1.641574983 | 33.95050762 | 2.24494751 | 0.003593372 | 0.00265 | 0.08474192 | 31 |
| 4:10:29 PM | 68.47118059 | 1.68841888 | 31.19265787 | 2.278897385 | 0.003748603 | 0.00267 | 0.08411312 | 32 |
| 4:10:29 PM | 67.24840886 | 1.74632377 | 28.48246606 | 2.35202062 | 0.004043884 | 0.00272 | 0.081343009 | 33 |
| 4:10:29 PM | 65.79820965 | 1.801418985 | 29.44004535 | 2.42040774 | 0.004308511 | 0.00277 | 0.089223876 | 34 |
| 4:10:29 PM | 64.52312612 | 1.859768233 | 30.25030905 | 2.553891403 | 0.004738021 | 0.00281 | 0.095441427 | 35 |

Slika 3. Primjer tablice s podacima dobivenim mjerenjem u automobilu



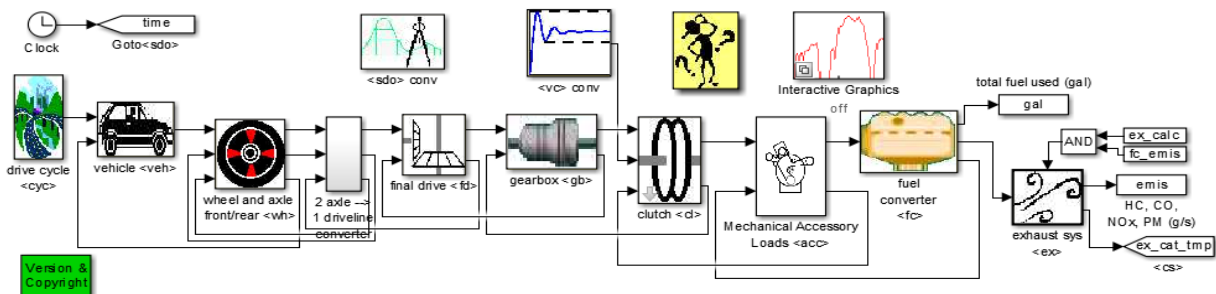
Slika 4. Profil brzina na analiziranoj dionici

Izmjerena prosječna potrošnja goriva na navedenoj dionici iznosi 5,9 l/100 km i veća je od one dobivene simulacijom za 0,3 l/100 km. Ostvarena razlika iznosi manje od 5% te se može zaključiti kako simulacija daje realistične rezultate. Treba uzeti u obzir da je u računalnoj simulaciji pretpostavljeno da se vozi samo ova dionica, s početno hladnim motorom, dok je mjerenje izvedeno sa zagrijanim motorom u sklopu puta od Rijeke do Zagreba, što rezultira nižom potrošnjom goriva. Može se zaključiti kako su rezultati simulacije vrlo bliski izmjerenim vrijednostima potrošnje goriva, pa se pretpostavlja da su i rezultati emisija štetnih plinova realistični.

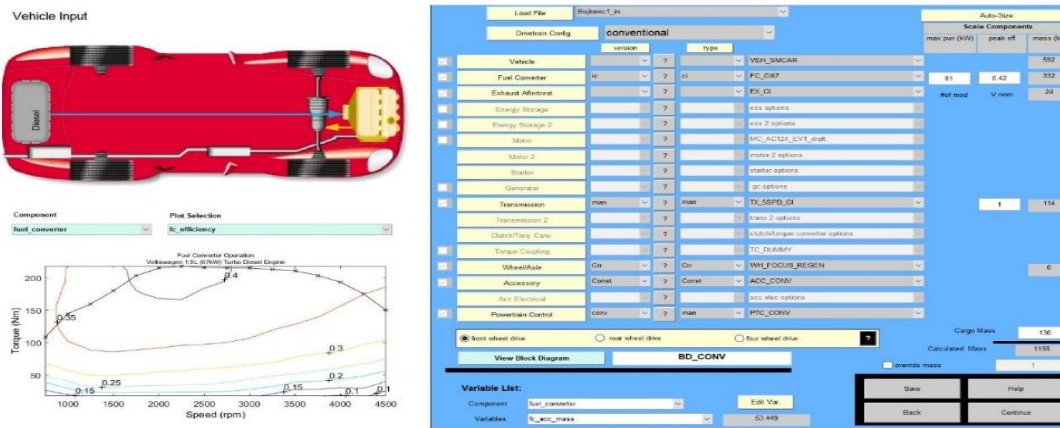
3 Računalna aplikacija Advisor

Simulacija potrošnje goriva vozila obavljena je pomoću računalne aplikacije ADVISOR (Wipke i dr., 1999.), (Markel i dr., 2002.). Naziv računalne aplikacije je akronim punog naziva "ADvanced Vehicle SimulatOR". Računalna aplikacija se sastoji od više potprograma koji rade u Matlab/Simulink okruženju. Matlab je upotrijebljen jer omogućuje jednostavno programiranje matricnih operacija dok je Simulink korišten za jednostavno grafičko povezivanje pojedinih računskih operacija unutar kompleksnog proračuna. Računalna aplikacija Advisor je besplatna i dostupna putem interneta od 1998. godine. Aplikacija je prvobitno razvijena u studenome 1994. godine od strane Nacionalnog laboratorija za obnovljive izvore energije Sjedinjenih Američkih Država (National Renewable Energy Laboratory - NREL). Prvotno je razvijen kao alat koji olakšava razvoj i konstruiranje vozila s hibridnim pogonom, ali ubrzo postaje naprednija i fleksibilnija računalna aplikacija. Osnovna namjena ove aplikacije je analiza pogonskog sustava vozila te prijenosa snage između komponenti koje sudjeluju u pogonu vozila (motor, spojka, mjenjač stupnjeva prijenosa, diferencijal, kotači...). Simulacija podržava različite sustave pretvorbe energije: motor s unutarnjim izgaranjem s pripadnim spremnikom goriva, sustav elektromotora s baterijama ili gorivnim člancima te kombinacije za hibridne pogone. Neke od komponenti su predstavljene jednostavnim matematičkim modelima a neke su predstavljene empirijskim modelima,

odnosno njihovo ponašanje je ispitano u laboratorijskim uvjetima, a rezultati su pohranjeni u bazi podataka u tabličnoj formi. Tako su primjerice, za motor s unutarnjim izgaranjem na raspolaganju niz tablica s performansama ovisno o brzini vrtnje i opterećenju, a koje su dobivene ispitivanjem u laboratoriju na ispitnom stolu. Na raspolaganju su setovi podataka o potrošnji goriva i emisija štetnih plinova, posebno za hladan motor, a posebno za motor zagrijan na radnoj temperaturi. Programski kod je otvorenoga tipa, te je moguće intervenirati u pojedine modele i prilagoditi ih vlastitim ili specifičnim potrebama. Svojstva komponenti su skalabilna, tako da ih je moguće prilagoditi svakom vozilu. Računalna aplikacija je modularna što znači da je svaka komponenta programirana u Matlab okruženju te joj je pridružena ikona u Simulink okruženju. Pojedine komponente se tako spajaju u kompleksniji sustav vozila. Primjer takvog sustava prikazan je na Slici 5. Računalna aplikacija ima vrlo intuitivno grafičko sučelje koje se sastoji od tri prozora. U prvom prozoru, Slika 6, izabiru se osnovne karakteristike vozila. Na lijevom gornjem dijelu ekrana prikazan je simbolični prikaz vrste vozila s glavnim komponentama u tlocrtu, dok se u lijevom donjem kutu prikazuju dijagrami koji prikazuju svojstva glavnih komponenti koje se mogu odabrati pomoću padajućeg izbornika. S desne strane je panel s nizom padajućih izbornika i polja u kojima se namještaju svojstva pojedinih komponenti vozila.



Slika 5. Blok-dijagram modela vozila u Simulink okruženju



Slika 6. Sučelje za postavljanje karakteristika vozila u računalnoj aplikaciji Advisor

Tako su u primjeru automobila analiziranog u ovome radu, odabrani parametri za automobil s dizelskim, benzinskim i hibridnim pogonom, a performanse osnovnih komponenti su postavljene da odgovaraju analiziranim automobilima. Najvažniji parametri su snaga i stupanj iskoristivosti motora te masa vozila. Drugi prozor, koji se otvara nakon što se završi modeliranje vozila, omogućuje odabir dionice vožnje, i to zasebno za profil brzine i profil nagiba ceste. Ovo je moguće odabrati pomoću padajućeg izbornika koji nudi niz prethodno pohranjenih profila i standardnih voznih ciklusa. U ovom slučaju, korišten je profil brzina dobiven mjerenjem tijekom testne vožnje, a u aplikaciju Advisor je unesen i profil nagiba ceste očitani pomoću Google Maps aplikacije.

Računalna aplikacija Advisor omogućuje detaljnu analizu potrošnje goriva i nastanka štetnih plinova za različite tipove vozila, opremljena različitim izvedbama pogona, prijenosa snage i sustavima obrade ispušnih plinova. Činjenica da je računalna aplikacija besplatna te da ima otvoreni programski kod, čini je prikladnom za znanstveni rad i razvoj unaprijeđenih i novih simulacijskih modela te za stjecanje spoznaja o njihovom radu i karakteristikama u eksploataciji.

4 Karakteristike vozila

Mjerenje je provedeno na automobilu Ford Focus iz 2005. godine opremljenom dizelskim motorom 1.6 TDCi, Slika 7. Ostale tehničke specifikacije vozila preuzete su iz baze podataka vozila u računalnoj aplikaciji Advisor čime se nastojalo postavke prilagoditi što bliže realnom automobilu koji se testira. Za usporedbu karakteristika automobila s

različitim motorima, odabran je model automobila Ford Focus iste godine proizvodnje, ali opremljen benzinskim motorom radne zapremine 2000 cm³. Izabrani benzinski motor razvija veću snagu od dizelskog motora, dok dizelski motor veći okretni moment. Automobili opremljeni spomenutim motorima su imali otprilike istu nabavnu cijenu. Za usporedbu automobila s hibridnim pogonom, odabran je automobil Toyota Prius, jedan od najpoznatijih automobila s hibridnim pogonom (Slika 8.)



Slika 7. Ford Focus 2005.



Slika 8. Toyota Prius 2000.

Odabran je model iz 2000. godine jer je po razini tehnologije usporediv s automobilom na kojem je

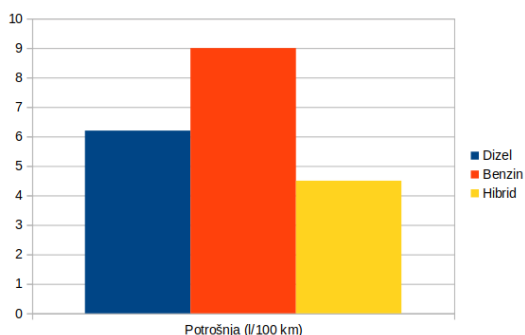
provedeno mjerenje, a u računalnoj aplikaciji Advisor su raspoloživi podaci mjerenja s ispitnog stola upravo spomenuti model automobila. Odabrana vozila su slična po dimenzijama, masi i po namjeni. Osnovne karakteristike vozila navedene su u Tablici 1.

| Model automobila | Ford Focus 1.6 TDCi (2005) | Ford Focus 2.0 16V (2005) | Toyota Prius (2000) |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Osnovne dimenzije | 4342 x 1991 x 1497 mm | 4342 x 1991 x 1497 mm | 4308 x 1695 x 1463 mm |
| Motor | 4 cilindra, 1596 cm ³ | 4 cilindra, 1999 cm ³ | 4 cilindra, 1497 cm ³ |
| Masa | 1272 kg | 1326 kg | 1254 kg |
| Snaga | 85 kW | 108 kW | 43 kW + 30 kW |
| Deklarirana potrošnja goriva | 5,5 l/100 km | 7,1 l/100 km | 4,8 l/100 km |
| Emisija CO ₂ | 127 g/km | 160 g/km | 138 g/km |

Tablica 1. Karakteristike automobila odabranih za simulaciju

5 Rezultati

Rezultati simulacije vožnje automobila s dizelskim, benzinskim i hibridnim pogonom na zadanoj trasi, prikazani su u Tablici 2. Automobil s dizelskim motorom je na izabranoj dionici ostvario prosječnu potrošnju goriva od 6,2 l/100 km. Simulacija predviđa da bi automobil s hibridnim pogonom na istoj dionici, uz jednaki profil brzina, ostvario prosječnu potrošnju od 4,5 l/100 km, što predstavlja uštedu od 27% u odnosu na inače ekonomičan dizelski pogon, dok bi automobil s benzinskim motorom imao prosječnu potrošnju goriva od 9 l/100 km. Grafički prikaz ovih rezultata dan je na Slici 9.



Slika 9. Usporedba potrošnje goriva automobila s različitim pogonima

Računalna aplikacija Advisor ne izračunava emisiju ugljikovog dioksida, ali nju je relativno jednostavno odrediti ako je poznata potrošnja i vrsta goriva.

Prosječna gustoća dizelskog goriva je 0,875 kg/dm³. Prosječni maseni udio ugljika u dizelskom

gorivu iznosi $y_c = 86,2\%$ iz čega proizlazi da je masa ugljika po litri dizelskog goriva:

$$m_c = m_g \cdot y_c = 875 \cdot 0,862 = 720 \text{ g/l.} \quad (1)$$

Da bi izgaranje goriva u motoru bilo potpuno, po litri dizelskog goriva potrebno je dovesti masu kisika od barem $m_{O_2} = 1920 \text{ g}$. Na taj se način može odrediti količina ugljikovog dioksida nastalog pri izgaranju litre dizelskog goriva (Ecoscore, 2022):

$$m_{CO_2-dizel} = m_c + m_{O_2} = 720 + 1920 = 2640 \text{ g/l.} \quad (2)$$

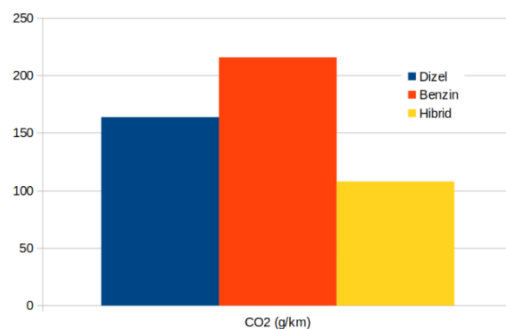
Za proračun nastalog ugljikovog dioksida pri izgaranju benzinskog goriva koristi se sličan izračun. Prosječna gustoća benzinskog goriva je 750 g/l, dok je prosječan maseni udio ugljika u benzinu iznosi $m_c = 87 \%$, pa slijedi da je masa ugljika po litri benzina:

$$m_c = m_g \cdot y_c = 750 \cdot 0,87 = 652 \text{ g/l.} \quad (3)$$

Za potpuno izgaranje litre benzinskog goriva potrebno je 1740 g kisika te iz toga slijedi količina nastalog ugljikovog dioksida po litri benzinskog goriva (Ecoscore, 2022):

$$m_{CO_2-benzin} = m_c + m_{O_2} = 652 + 1740 = 2392 \text{ g/l.} \quad (4)$$

Količina ugljikovog dioksida koju emitira automobil po jedinici prijeđenoga puta može se izračunati množenjem potrošnje goriva i mase ugljikovog dioksida koji nastaje izgaranjem prema jednadžbama (2) i (4). Prema gore navedenome, proizlazi da automobil s benzinskim motorom na analiziranoj dionici emitira 215,5 g CO₂/km, što je praktički dvostruko više nego automobil s hibridnim pogonom, koji emitira 107,8 g CO₂/km. Automobil s dizelskim motorom ima emisiju točno između ovih ekstrema te emitira 163,7 g CO₂/km. Emisije ugljikovog dioksida za ove tri vrste pogona na opisanoj dionici prikazane su grafički na Slici 10. Emisija ugljikovog dioksida je proporcionalna potrošnji goriva, s time da pri izgaranju dizelskog goriva nastaje nešto više ugljikovog dioksida po jedinici mase goriva nego pri izgaranju benzinskog goriva.



Slika 10. Emisije ugljikovog dioksida izračunate iz potrošnje goriva i vrste goriva

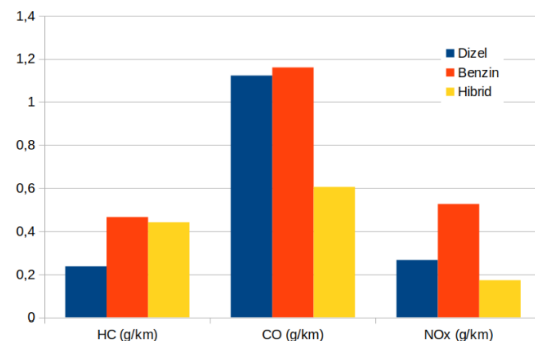
U Tablici 2. prikazani su rezultati simulacije potrošnje goriva, izračunata emisija ugljikovog dioksida te rezultati simulacije emisije štetnih plinova za tri simulirana pogona automobila.

| | Potrošnja (l/100km) | CO ₂ (g/km) | HC (g/km) | CO (g/km) | NO _x (g/km) |
|--------|---------------------|------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| Dizel | 6,2 | 163,7 | 0,237 | 1,122 | 0,266 |
| Benzin | 9,0 | 215,5 | 0,465 | 1,16 | 0,526 |
| Hibrid | 4,5 | 107,8 | 0,441 | 0,605 | 0,172 |

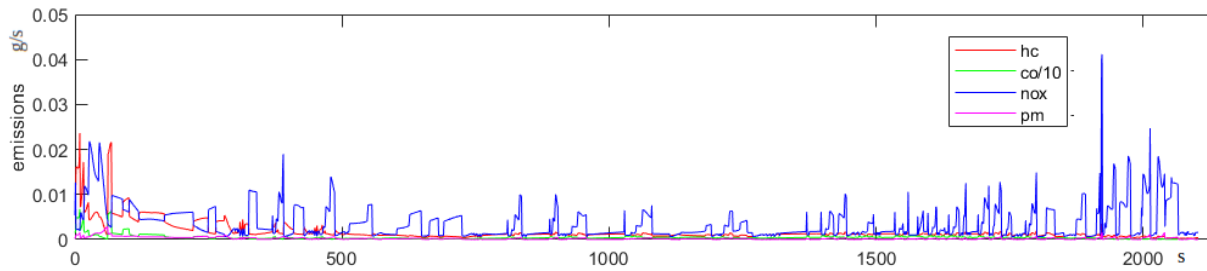
Tablica 2. Rezultati mjerenja i simulacije potrošnje goriva i emisije štetnih plinova

Prema simulaciji, benzinski i hibridni pogon su nepovoljniji što se tiče emisije neizgorelih ugljikovodika, jer su prosječne emisije na testnoj dionici iznosile 0,465 g HC/km i 0,441 g HC/km za benzinski i hibridni pogon, dok je automobil s dizelskim motorom emitirao prosječno 0,237 g HC/km. Ovo je donekle neočekivan rezultat jer je automobil s benzinskim motorom opremljen katalizatorom trostrukog djelovanja koji je vrlo djelotvoran u eliminaciji neizgorelih ugljikovodika. Razlog zašto su dobiveni ovakvi rezultati leži u činjenici da je kod postavljanja parametara simulacije pretpostavljeno da automobil započinje vožnju dionice s hladnim motorom (i hladnim katalizatorom), a da bi katalizator postao djelotvoran, potrebno je da se zagrije na odgovarajuću radnu temperaturu. Potvrdu za ovu tvrdnju može se vidjeti na Slikama 12. i 13. na kojima je prikazana trenutna razina emisije tijekom trajanja simulacije za automobil s benzinskim i hibridnim pogonom. Iz trenda krivulja se može uočiti da su emisije najveće u prvih nekoliko minuta vožnje, odnosno dok motor, i naročito katalizator, ne postignu radnu temperaturu. Što se tiče emisije ugljikovog monoksida, povoljnije je hibridno vozilo koje je emitiralo 0,605 g CO/km, što je gotovo upola manje nego kod automobila s benzinskim i dizelskim motorom. Kod automobila s benzinskim motorom je većina ugljikovog monoksida nastala tijekom prvih nekoliko minuta vožnje dok katalizator nije postigao radnu temperaturu (Slika 13.). Manja emisija ugljikovog monoksida kod dizelskog motora posljedica je većeg viška usisanog zraka s kojim motor radi pri djelomičnim opterećenjima pa se izgaranje goriva odvija u uvjetima s viškom kisika. Stalne promjene opterećenja motora, diktirane dinamikom prometa

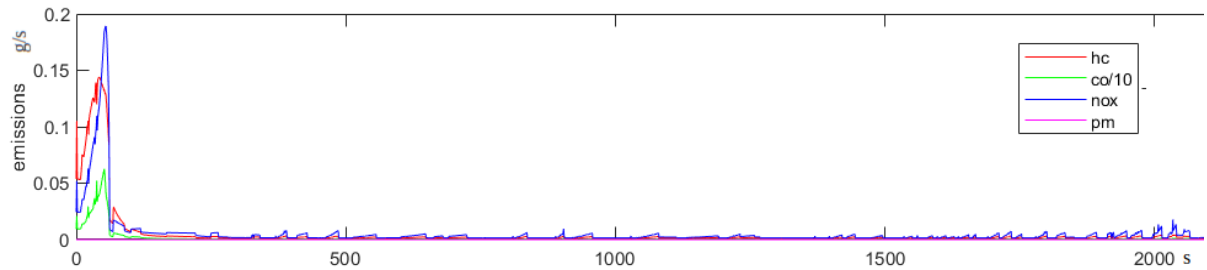
na testnoj dionici, utječu na promjenjivu količinu goriva ubrizganu u cilindre motora te se zbog toga ne uspijeva postići potpuna oksidacija ugljikovog monoksida. Što se tiče emisije dušikovih oksida, rezultati ukazuju da je najnepovoljniji automobil s benzinskim pogonom, koji emitira prosječno 0,526 g NO_x/km. No, iz dijagrama na Slici 13. može se uočiti da je, kao i za ostale štetne plinove, kritično prvih nekoliko minuta vožnje, dok se ne postigne potrebna radna temperatura. Nakon toga, kod benzinskog i hibridnog pogona, emisije dušikovih oksida su vrlo niske (Slika 14.). S druge strane, kod automobila s dizelskim motorom, emisija dušikovih oksida poraste uvijek kada se motor izloži povećanom opterećenju (Slika 12.). Očekivano, automobil s dizelskim motorom ima relativno visoke emisije dušikovih oksida od 0,266 g NO_x/km. Dušikovi oksidi su jedan od temeljnih problema koji se vezuje uz izgaranje u dizelskom motoru. Kako bi motor postigao visoku učinkovitost radi s visokim kompresijskim omjerom. Posljedica toga su visoki radni tlakovi i temperature, što višestruko ubrzava proces nastajanja dušikovih oksida. Kod benzinskih motora opremljenih katalizatorom trostrukog djelovanja, redukcija dušikovih oksida se provodi uspješno i efikasno, što je također slučaj i kod suvremenih dizelskih motora opremljenih sustavom za selektivnu katalitičku redukciju. Grafički prikaz vrijednosti prosječnih emisija dobivenih simulacijskim modelima prikazan je na Slici 11. Prosječna vrijednost emisija krutih čestica izračunata simulacijskim modelom automobila s dizelskim motorom doseže vrijednost od 0,024 g PM/km, ali taj podatak nije prikazan u tablicama i dijagramima jer su emisije krutih čestica kod benzinskih motora zanemarive, pa usporedba ne bi imala smisla.



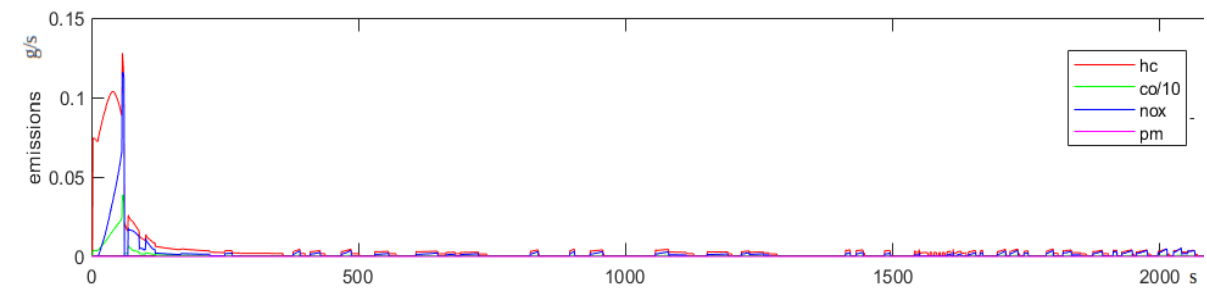
Slika 11. Prosječne emisije štetnih plinova



Slika 12. Trenutna emisija štetnih plinova automobila s dizelskim motorom



Slika 13. Trenutna emisija štetnih plinova automobila s benzinskim motorom



Slika 14. Trenutna emisija štetnih plinova automobila s hibridnim pogonom

6 Zaključak

U radu je provedena analiza potrošnje goriva i emisije štetnih plinova automobila s različitim pogonom. Pomoću računalne aplikacije Advisor provedena je simulacija automobila s dizelskim i benzinskim motorima te s hibridnim pogonom. Analizirani su podaci o potrošnji goriva i emisijama štetnih plinova čime je ostvaren cilj rada.

Iz analize dobivenih rezultata može se zaključiti da je potrošnja goriva na dionici s gradskim prometom kod automobila s dizelskim motorom oko 30% veća nego kod automobila s hibridnim pogonom, a kod automobila s benzinskim motorom čak dvostruko veća. Ovakvi su rezultati jednim dijelom očekivani, ali su razlike između deklariranih potrošnji goriva od strane proizvođača znatno premašene. Isto tako, i prosječna potrošnja goriva na testnoj dionici premašuje prosječnu potrošnju deklariranu od strane proizvođača automobila.

Emisija štetnih plinova je najveća kod automobila s benzinskim motorom, a najniža kod automobila s hibridnim pogonom.

Kod automobila s benzinskim motorom (uključujući i hibridni pogon) problematičan je hladni start i period dok motor i katalizator ne postignu odgovarajuću radnu temperaturu. U tom periodu je nastao najveći dio emisija tijekom vožnje na testnoj dionici. Kada bi se zanemarile početne visoke emisije benzinskog motora, dizelski bi motor bio daleko najnepovoljniji po emisijama štetnih plinova. No, u realnim uvjetima u kojima se automobili svakodnevno koriste, kratke vožnje s hladnim startom zauzimaju prilično velik udio. Kao što se moglo očekivati, dizelski motor ima visoke emisije dušikovih oksida. To je moguće ublažiti modernijim sustavima kao što je selektivna katalitička redukcija, ali to onda i povisuje cijenu pogonskog sustava.

Literatura

- Barnitt, R., Gonder, J. (2011). Drive Cycle Analysis, Measurement of Emissions and Fuel Consumption of a PHEV School Bus, SAE 2011 World Congress & Exhibition, Detroit, MI, USA, 2011, SAE Paper 2011-01-0863.
- Bojković, B. (2021). Simulacija potrošnje goriva osobnog vozila s alternativnim pogonom, Diplomski rad, Tehnički fakultet, Rijeka.
- Carscanner. (2022). Preuzeto s <https://www.carscanner.info/>
- Cars data, podaci o automobilima. (2022). Preuzeto s <https://www.cars-data.com/en/>
- Volkswagen emission scandal. (2022). Preuzeto s https://en.wikipedia.org/wiki/Volkswagen_emissions_scandal
- Ecoscore. (2022). Preuzeto s <https://ecoscore.be/en/info/ecoscore/co2>
- European emission standards. (2022). Preuzeto s https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards
- Falchetta, G., Noussan M. (2021). Electric vehicle charging network in Europe: An accessibility and deployment trends analysis, Transportation Research Part D. 94. doi: 10.1016/j.trd.2021.102813
- United Nations Climate Change Conference. (2021). Preuzeto s https://en.wikipedia.org/wiki/2021_United_Nations_Climate_Change_Conference
- Gonder, J.D. (2008). Route-Based Control of Hybrid Electric Vehicles, SAE 2008 World Congress Detroit, MI, USA, SAE Paper 2008-01-1315
- Markel, T. i dr. (2002). ADVISOR: a system analysis tool for advanced vehicle modeling, Journal of Power Sources, 110, 255-266.
- Oil spill. (2022). Preuzeto s https://en.wikipedia.org/wiki/Oil_spill
- Thomas, C. E. S. (2009), Transportation options in a carbon-constrained world: Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles, International Journal of Hydrogen Energy, 34, 9279–9296.
- Wipke, K. i dr. (1999). Advisor 2.0: A Second-Generation Advanced Vehicle Simulator for System Analysis, National Renewable Energy Laboratory, Colorado.
- Zhanga, Q., Lia C., Wu, Y. (2017). Analysis of Research and Development Trend of the Battery Technology in Electric Vehicle with the

Perspective of Patent, Energy Procedia, 105, 4274–4280.

Fuel consumption and emissions simulation of cars with different power options

Abstract

Fuel consumption and emissions have a very large impact on the environment, and depend on the type of car powertrain, terrain configuration, vehicle load and vehicle speed. In this paper, a simulation was performed using Advisor vehicle simulation software on a specific urban route. Using factory-installed sensors, engine ECU and car OBD2 connection, the current speed and fuel consumption of a car with diesel engine were measured. Using Advisor software, a simulation models of a passenger car with diesel, petrol and hybrid powertrain were made. The measured speed profile of the real car was used as input data in simulations for cars with different powertrains. The comparison of simulation and measurement results was used to validate the computer model in terms of fuel consumption. Fuel consumption, carbon dioxide emissions, unburned hydrocarbon emissions, carbon monoxide and nitrogen oxide emissions were calculated. The obtained results are expected, although the differences between individual powertrains are more pronounced than declared by the manufacturers. The highest fuel consumption and the highest emission was achieved by a car with petrol engine, and the lowest by a car with hybrid powertrain. The fact that a three-way catalytic converter installed in a car with petrol and hybrid drive becomes effective only after a few minutes of operation, when the operating temperature is reached, has a significant impact on emissions.

Keywords: fuel consumption; emissions; Advisor vehicle simulation.