

ALTERNATIVNI POGON KAO TEHNOLOGIJA SMANJENJA NEGATIVNOG UTICAJA SAOBRAĆAJA NA ŽIVOTNU SREDINU

Nemanja Stepanović, dipl. inž. saobr.

Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

dr Vladan Tubić, dipl. inž. saobr.

Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu, vladan@sf.bg.ac.rs

Stručni rad

Rezime: U svetu je u samo u 2016. godini prodato oko 100 miliona novih vozila, što rezultuje porastom stepena motorizacije i transportnog rada. Drumski transport učestvuje sa preko 22% ukupne emisije CO₂, odnosno kao dominantan izvor emisije NO_x sa učešćem od 40% ukupne emisije ovih štetnih gasova. Uprkos brojnim strategijama i politikama održive mobilnosti, upotreba putničkih automobila, kao izrazito dominantne kategorija vozila, je u konstantnom porastu. U ovom radu dat je prikaz aktuelne tehnologije vozila na alternativni pogon koje imaju za cilj smanjenje emisije štetnih materija koje se ispuštaju u okolinu. Prikazana je tehnologija hibridnog, električnog pogona ali i tehnologija vodoničnih gorivnih ćelija, uz poređenje njihovog „ekološkog otiska“ sa vozilima na konvencionalni pogon. Razmatran je uticaj kako direktnih, tako i indirektnih efekata (tzv. Well-to-Wheel analiza) svakog pogonskog sistema. Pregledom literature zaključeno je da najveći potencijal u smanjenju emisije štetnih gasova imaju vozila pokretana vodoničnim gorivnim ćelijama, ako se tehnologija dobijanja vodonika iz prirode zasniva na obnovljivim izvorima ili prirodnom gasu. Dobre rezultate u smanjenju štetnog uticaja pokazuje i hibridizacija vozila, zahvaljujući samostalnoj dopuni baterija (regenerativnim kočenjem) u toku vožnje. Opšti zaključci pokazuju da primena novih tehnologija alternativnog pogona može doprineti zaštiti životne sredine isključivo u slučaju upotrebe obnovljivih izvora za dobijanje energije.

Ključne reči: alternativni pogon, životna sredina, gasovi staklene bašte, obnovljivi izvori energije

ALTERNATIVE FUEL VEHICLE AS THE TECHNOLOGY FOR REDUCTION OF NEGATIVE TRANSPORT INFLUENCE ON THE ENVIRONMENT

Nemanja Stepanović, dipl. inž. saobr.

Faculty of Traffic and Transport Engineering, University of Belgrade, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

dr Vladan Tubić, dipl. inž. saobr.

Faculty of Traffic and Transport Engineering, University of Belgrade, vladan@sf.bg.ac.rs

Professional paper

Abstract: 100 million of new vehicles were sold in the World in 2016, resulting in an increase in mobility and passenger-kilometre. Road transport participates with

over 22% of the total CO₂ emissions, as well as with dominant 40% share of NO_x emission. Despite the numerous policies and strategies of sustainable mobility, the use of passenger cars, as an extremely dominant category of vehicles, is at a steady pace. This paper presents an overview of the current technology of the alternative fuel vehicles whose main goal is to reduce emissions of harmful pollutants released into the environment. The technology of hybrid, battery electric and hydrogen fuel cell electric vehicles is presented, comparing their carbon footprint with the one of conventional, internal combustion engine vehicles. The influence of both direct and indirect effects (so-called Well-to-Wheel analysis) of each mentioned drive system technology was considered. Literature review showed that hydrogen fuel cell technology has the greatest potential in reducing, if hydrogen is generated from natural gas, or renewable sources. Hybridization of gasoline vehicles also showed a good result in reducing greenhouse gas (GHG) emission, thanks to its self-charging batteries. General conclusion indicates that the application of new alternative fuel vehicle technology can significantly contribute to environmental protection only if renewable energy sources are used.

Keywords: alternative fuel vehicle, environment, greenhouse gas, renewable energy sources, Well-to-Wheel analysis

1. UVOD

Saobraćajni tok se sastoji od sistema čovek-vozilo-put-okruženje. Posebno bitan element ovog sistema jesu vozila, kojih sa porastom stanovnika i ekonomskog razvoja brojnih zemalja ima sve više. U svetu je samo u 2016. godini prodato skoro 100 miliona novih vozila, što predstavlja rast u odnosu na 2006. godinu za oko 30 miliona, uprkos ekonomskoj krizi koja je samo privremeno usporila ovaj trend. (OICA 2016) Velika prodaja vozila uz sve veće potrebe ljudi za kretanjem rezultuju porastom stepena motorizacije, naročito u zemljama i regionima koji ekonomski jačaju i u kojima se vozila koriste kako za realne, tako i za potrebe koje se mogu obaviti alternativnim vidovima transporta. Uprkos brojnim strategijama i politikama održive mobilnosti, činjenice pokazuju da upotreba putničkih automobila, kao izrazito dominantne kategorija vozila, predstavlja naviku koje se korisnici teško odriču. Ovaj problem pored efikasnosti saobraćajnog toka i bezbednosti, negativno utiče i na životnu sredinu.

Razne organizacije koje se bave ekološkim analizama i koje učestvuju u kreiranju politika i strategija za očuvanje životne sredine primorale su proizvođače vozila još krajem prošlog veka, da značajnije unaprede osobine svojih vozila po pitanju izdvunih gasova.

Najpre su vozila sa motorima sa unutrašnjim sagorevanjem opremljena katalizatorima, filterima za čestice i čađ, olovo je izbačeno iz goriva itd. U mnogobrojnim zemljama kreirani su emisijni standardi koje nova vozila moraju da zadovolje (evropski EURO, američki EPA, japanski MOE standardi itd.) i koji su iz godine u godinu sve stroži po pitanju emisijih čestica. Uprkos većoj efikasnosti u pogledu smanjene potrošnje goriva i emisije štetnih gasova novih motora, usled značajnog povećanja broja vozila na putevima nije došlo do drastičnog pada emisije pojedinih štetnih gasova (CO₂, NO_x...), dok je emisija pojedinih čestica i porasla. Zbog toga su pojedine zemlje definisale strategije smanjenja emisija štetnih materija koje podrazumevaju strogu dinamiku realizacije i drastično smanjenje gasova i čestica opasnih po zdravlje stanovništva.

S obzirom da usavršavanje efikasnosti motora sa unutrašnjim sagorevanjem dostiže svoje granice, neophodan je razvoj i primena tehnologije koja će drastično smanjiti emisije izduvni gasova i ostalih materija koje vozila ispuštaju u okolinu tokom svog životnog veka. Jedinu moguću način dostizanja zacrtanih ciljeva je razvoj tehnologije alternativnog pogona. Međutim, emisije jednog vozila tokom njegove eksploatacije ne čine ukupan „ekološki otisak“. Naime, potrošnja energije i određeno zagađenje životne sredine javljaju se i u procesu proizvodnje samog vozila i njegovih komponenta, proizvodnje i dopremanja pogonskog goriva (benzina, dizela, struje, vodonika, gasa itd.) do vozila, uticaj razgradnje pojedinih pogonskih komponenti po isteku životnog veka itd. S obzirom da je reč o elementima drumskog transporta odnosno vozilima koja su prisutna u velikom broju i koja se često dopunjuju pogonskim gorivom, naročito značaj ima analiza „životnog ciklusa“ goriva, tzv. Well-to-Wheel analiza. Ove analize mogu nam odgovoriti na pitanje koje je pogonsko gorivo budućnosti.

U nastavku rada dat je opšti pregled tehnoloških rešenja alternativnih pogonskih sistema s ciljem smanjenja emisije štetnih gasova i literarni pregled najznačajnijih istraživanja podobnosti masovne primene pojedinih tehnologija u budućnosti iz aspekta zaštite životne sredine.

2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA I STRUKTURA RADA

Cilj rada odnosi se na izdvajanje aktuelnih tehnoloških rešenja alternativnog pogona i analiza njihovih parametara odnosno efikasnosti u smanjenju emisije štetnih gasova tokom celog procesa upotrebe pogonskog goriva – od proizvodnje do upotrebe i analize produkata.

Kako bi se na najbolji način postigao prethodno opisani cilj, neophodno je pre svega prikazati uzroke odnosno potrebe za primenom novih tehnologija u pogonskim sistemima vozila. Ovo je postignuto pretragom stručne i naučne literature koja se bavi analizama različitih izvora zagađenja, pre svega podataka koji se uglavnom odnose na zemlje EU i SAD.

Radi uporedne analize uticaja alternativnih rešenja pogonskih sistema na životnu sredinu, potrebno je prikazati osnovnu tehničku koncepciju nekih od danas (i u budućnosti) najviše zastupljenih tehnologija. Ovaj osnovni pregled koncepta raznih pogonskih sistema (vozila sa motorom na unutrašnje sagorevanje, hibridna vozila, elektro vozila sa baterijama, vozila na vodonične ćelije itd.) prikazan je na osnovu brojnih informacija proizvođača na koje se može naći literarnim pregledom i pretragom svakog sistema pojedinačno.

Poslednji ali i najbitniji deo rada na osnovu koga možemo da donesemo određene zaključke o potencijalima svakog od različitih sistema alternativnog pogona, sastoji se od literarnog pregleda i prikaza najznačajnijih uporednih istraživanja sprovedenih širom sveta. Reč je o radovima objavljenim u eminentnim časopisima koje se bave ekologijom i zaštitom životne sredine, energijom odnosno fizičkim, hemijskim rešenjima iz oblasti gorivnih ćelija, električnih vozila itd, kao što su: *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *Fuel Cells – From fundamentals to systems* (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co), *Energy*, *Energy Policy*, *International Journal of Hydrogen Energy*...

Iz navedenih korišćenih izvora izvučene su relevantne informacije i rezultati neophodni za donošenje zaključaka o ukupnom uticaju različitih alternativnih pogonskih sistema na smanjenje uticaja štetnih gasova odnosno očuvanje životne sredine i zdravlja ljudi.

3. UTICAJ TRANSPORTA NA ŽIVOTNU SREDINU

Uticaj transporta na ekonomski, energetska i sve ostale aspekte života ljudi je izuzetno veliki. Saobraćaj i transport imaju velike negativne posledice ali je bez njih jednostavno nemoguće zamisliti život ljudi na bilo kojoj tački planete Zemlje. Transportni sektor je važna ekonomska grana pa je tako samo u zemljama EU (15 zemalja članica) čak 14 miliona ljudi (10% ukupne radno sposobne populacije) direktno ili indirektno zaposlena u ovom sektoru: oko 6 miliona u transportnim uslugama, 2 miliona u sektoru opreme i dodatnih 6 miliona na poslovima povezanih sa transportom. Čak 14% porodičnih prihoda je vezano za transport.

Modalna raspodela transportnih zahteva je sledeća: skoro 79% se kreće putničkim automobilom, dok se ostatak od 21% kreće autobusima, vazдушnim, železničkim i vodnim saobraćajem. Što se tiče transporta robe (t*km), modalna raspodela izgleda nešto drugačije: 43% otpada na drumski transport, 41% na pomorski, 9% na železnički, 4% na rečni i 3% na cevni transport. (Van Mierlo, Magetto, 2007) Zahtevi za drumskim transportom su se u poslednjim decenijama drastično povećali. U periodu od 1970. do 2005, prosečna mobilnost ljudi se duplirala sa 17 na 35 km. Ukupni transportni rad u Evropi se povećao za 25% u periodu između 1995. i 2008. godine. (Pasaoglu et al. 2012) Kao što je već pomenuto, danas se u svetu proda godišnje oko 100 miliona novih vozila, uz dostignuti prosečan godišnji rast prodaje od oko 4 miliona vozila, što je naročito zabrinjavajuće.

Uočeni porast mobilnosti, dominantno učešće putničkih automobila pogonjenih motorima sa unutrašnjim sagorevanjem i porast njihovog broja dorinosi povećanju zavisnosti od fosilnih goriva i emisiji štetnih izduvnih gasova koji uzrokuju efekat staklene bašte. Tako su se zahtevi transportnog sektora za naftnim derivatima povećali za oko 26% u zemljama EU od 1990. godine, od čeka preko 50% otpada na putničke automobile. U pogledu emisija CO₂, drumski transport je drugi najveći izvor CO₂, sa oko 22% ukupno emitovanog ugljen dioksida u 27 zemalja EU u 2008. godini. Više od 12% ukupne emisije CO₂ u EU otpada na emisiju putničkih automobila. (Pasaoglu et al. 2012)

Transportni sektor je jedan od najbrže rastućih sektora u zemljama EU u pogledu emisije CO₂ (sa stopom rasta od 36%) u poslednjih 18 godina. Analize su pokazivale da bi se ovaj rast nastavio odnosno da bi se emisija CO₂ duplirala do 2050. godine, bez tehnološkog napretka pogonskih sistema vozila i politika ograničenja emisija. Evropska Unija je zbog toga 2010. godine usvojila strategiju po kojoj bi emisija CO₂ trebala da se smanji za 20% do 2020. i za čak 80% do 2050. godine u odnosu na nivo iz 1990. godine. Da bi se to postiglo, potrebno je postići smanjenje od oko 60% u transportnom sektoru. (Pasaoglu et al. 2012) Pojedine analize pokazuju da bi za dostizanje tog cilja bilo potrebno smanjiti emisiju CO₂ u sektoru drumskog transporta za čak 95% do 2050. s obzirom da su mogućnosti smanjenja emisije drugih sektora dosta ograničene. (Thomas, 2012)

U SAD, sektor putničkih i lako teretnih vozila (dominantno sastavljen od tzv. pick-up, SUV vozila i kombija) odgovorni su za 17,7% svih emisija štetnih gasova koji uzrokuju efekat staklene bašte. Kako bi se dostiglo smanjenje od 80% u odnosu na nivo iz 1990. godine, transportni sektor bi morao da redukuje emisiju za 83%, dok bi putnička i lako teretna vozila morala i više od toga. (Thomas, 2012)

Pored emisije CO₂, drumski transport je izvor i ostalih polutanata. Naročito se izdvaja u emisiji NO_x, po čemu sa 40% predstavlja dominantan udeo emisije štetnih gasova u odnosu na sve ostale grane privrede zemalja EU. (Vestreng et al. 2009) (European Environment Agency, 2014) Ovaj produkt sagorevanja, pre svega dizel motora, predstavlja izuzetno opasno jedinjenje za respiratorni sistem ljudi. Naročito je opasna visoka koncentracija NO_x u gradovima i urbanim sredinama, gde je na relativno malom prostoru prisutan u značajnoj količini. Drumski transport je jedan od najvećih emitera i partikularnih čestica (PM10, PM2.5), takođe izuzetno opasnih po zdravlje ljudi, sa udelom od oko 12%. (European Environment Agency, 2014)

Uzevši u obzir sve navedeno, izuzetno štetne emisije polutanata koje nastaju kao produkt sagorevanja trenutno dominantnih pogonskih sistema (SUS motori), uz svakodnevni porast mobilnosti, transportnog sektora i broja vozila, zahtevaju što raniju, sveobuhvatnu implementaciju vozila opremljenih novim tehnologijama alternativnog pogona sa ciljem smanjenja negativnih uticaja na životnu sredinu u budućnosti.

4. TEHNOLOGIJA POGONA VOZILA

Ogromna većina vozila na putevima (oko 99% od današnjeg broja vozila) pokretana je tehnologijom motora sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS). Tehnologija SUS motora prisutna je duže od jednog veka. Uz konstantna usavršavanja u pogledu efikasnosti u proteklm decenijama, ona je i dalje jako niska pa tako najčešće varira između 33 i 43%, u zavisnosti od toga da li je u pitanju benzinski, dizel ili motor pogonjen gasom (CNG, LPG). (Gupta et al. 2016) Blagi potencijal za dalje usavršavanje SUS motora postoji ali je on blizu svojih granica. Prethodno nabrojani štetni efekti drumskog transporta na životnu sredinu direktna su posledica procesa sagorevanja fosilnih goriva u SUS motorima.

Zbog svega opisanog u ovom i prethodnom poglavlju, da bi se ostvarili zacrtani ciljevi smanjenja emisija CO₂, NO_x i ostalih polutanata, bio je neophodan razvoj alternativnih pogonskih tehnologija. Proizvođači su počeli sa masovnom serijskom proizvodnjom alternativnih pogona krajem prošlog veka. Postoji nekoliko sistema koji se danas koriste u većem ili manjem obimu i koji su ukratko opisani u nastavku.

4.1 Hibridna električna vozila

HEV vozila zasnivaju se na dva izvora energije - agregatu za pretvaranje energije (motor SUS ili gorivnih ćelija) i agregatu za akumuliranje proizvedene energije (akumulatori ili ultrakapacitatori).

Kompletan pogonski sistem sačinjavaju: toplotni (SUS) motor, električni generator, električni motor, energetska pretvarač i akumulatorske baterije. Smisao postojanja HEV se nalazi u činjenici da ova vozila nemaju problema sa radijusom kretanja jer koriste hemijsko gorivo za pogon toplotnog motora i istovremeno su ekološki čistija i efikasnija u odnosu na klasična vozila jer koriste pogodnosti električnog pogonskog sistema. Snaga instaliranih toplotnih i električnih mašina je veća od potrebne vučne snage i sam sistem je neuporedivo složeniji od EV i vozila sa SUS motorom. Postoje dve osnovne konfiguracije HEV: serijska i paralelna (slika 1). Izuzetak je Tojotin sistem koji ima kombinovan, serijsko-paralelni sistem. U HEV se koriste baterije drugačijih karakteristika u odnosu na EV. (Van Mierlo, Magetto, 2007) U ovom slučaju je mnogo značajnija specifična snaga i mogućnost brzog punjenja i pražnjenja akumulatora nego njihova velika specifična energija kao što je slučaj kod EV. Kapacitet akumulatora je manji nego kod EV. Pored nabrojanih HEV sistema, postoji i tzv. PHEV (*Plug-in hybrid electric vehicle*) koji funkcioniše slično HEV sistemu s tim što omogućava veću autonomiju kretanja zahvaljujući baterijama većeg kapaciteta koje je moguće puniti na spoljnoj mreži.

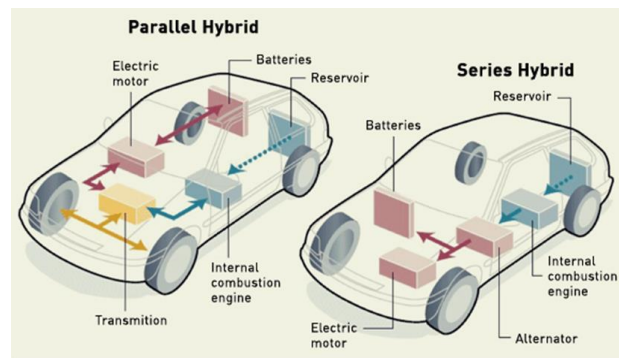
Serijski (eng. Serial) - redni

Kod serijskih vozila toplotni (SUS) motor pokreće poseban generator kojim se vučni motor snabdeva električnom energijom i dopunjavaju akumulatori. Toplotni motor se koristi u optimalnom radnom režimu, a regulacija brzine se ostvaruje električnim motorom. Postojanje akumulatora i električnog motora omogućava reverzibilno (motorno) kočenje čime se povećava efikasnost vozila. Kod ovog tipa isključivo električni motor služi za pokretanje vozila dok SUS motor služi za dopunu baterija kada se one isprazne. (Van Mierlo, Magetto, 2007) Primer serijskog sistema je Chevrolet Volt/Opel Ampera koji se sastoji iz električnog motora koji ima autonomiju kretanja od 40-80km u čisto električnom modu a kada se baterije isprazne benzinski motor se uključuje i dopunjava baterije dok vozilo i dalje pokreće električni motor. (General Motors, 2016)

Paralelni (eng. Parallel)

Paralelna HEV su koncipirana tako da točkove pokreću i toplotni (SUS) motor i električni motor/generator. Toplotni motor i kod ovog vozila radi u optimalnom režimu, pri čemu električna mašina radi kao generator i dopunjava baterije kada je za kretanje vozila potrebna manja snaga od snage toplotnog motora, a kada je potrebna veća snaga, onda električna mašina radi kao motor koristeći energiju iz akumulatora. Smisao uvođenja ovakve tehnologije HEV se može tražiti u činjenici da je efektivna snaga električnih mašina manja kao i

zbog toga što se ovaj sistem više zasniva na regenerativnom kočenju, čime je smanjena i težina vozila. Umesto posebnog motora i generatora ovde se koristi samo jedna mašina čija je snaga manja od snage vučnog motora kod serijskih vozila sličnih dimenzija. (Van Mierlo, Magetto, 2007)



Slika 1. Šema serijskog i paralelnog hibridnog sistema
Izvor: <https://crankit.in/hybrid-vehicle/>

Serijsko-paralelni (eng. Dual-mode)

Kod Prius-a (serijsko-paralelni eng. Dual mode) postoje i električni motor i generator, ali manjih snaga nego kod čisto serijske tehnologije. Prema potrebama vožnje moguće je da SUS motor pokreće samo generator ili da zajedno sa motorom pokreće točkove, a da generator miruje, kao i mogućnost kretanja vozila isključivo na struju do 2-3 km. Baterije se pune, pored dejstva SUS motora i regenerativnim kočenjem pri kojem se toplotna energija koja se inače ne koristi pretvara u električnu i preko generatora skladišti u baterijama. SUS motor se ne zasniva na klasičnom principu gde je primarno da se iskoristi veći obrtni moment na manjim obrtajima i veća snaga što rezultuje većom potrošnjom, već na Atkinsonovom principu gde je smanjena snaga i obrtni moment na malim obrtajima (jer mu pomaže električni motor koji maksimalni obrtni moment ostvaruje na malim obrtajima) kako bi bila bolja potrošnja. (Van Mierlo, Magetto, 2007)

4.2 Električna vozila (EV)

Električna vozila (EV) ili električna vozila na baterije (BEV) su vozila koja nisu opremljena motorom na unutrašnje sagorevanjem već isključivo elektromotorom koji crpi energiju iz baterija. Baterije su najčešće smeštene u podu vozila a njihova najvažnija karakteristika je energetska kapacitet odnosno korisna specifična energija i gustina. Danas su najčešće korišćeni sledeći tipovi baterija (Manzetti, Mariasiu, 2015):

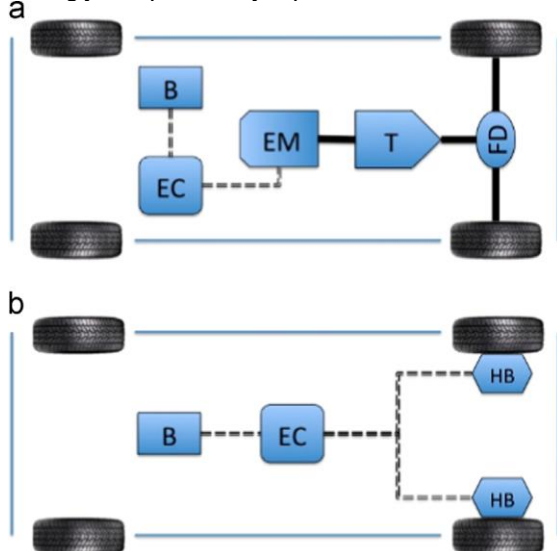
- PB-A: Olovna kiselina – ove baterije su najstariji tip baterija koje imaju jako nizak odnos sačuvane energije i težina odnosno zapremine i težine. Mana im je i prisustvo olova.

- NiCd: Nikl-Kadium – imaju najduži životni vek izražen u broju ciklusa punjenja i pražnjenja (oko 1500 ciklusa). Najveća mana im je korišćenje teških metala.
- NiMH: Nikl-Metal-Hidrid – Slične su NiCd baterijama a za razliku od litijum-jonskih imaju manji kapacitet i visok koeficijent samopražnjenja.
- Li-ion: Litijum-jonske – imaju veliki kapacitet sa dobrim odnosom gustine i težine. Mane su visoki troškovi, mogućnost samopregrevanja i ograničen životni vek.

Pored nabrojanih koje se najčešće koriste, postoje i Li-ion Polymer, Sodium Nickel Chlorid (NaNiCl) baterije itd. Baterije sa jednom od najvećih vrednosti specifične energije su ugrađene u modele Tesla automobila (S i P), sa odnosom od 140 Wh/kg. Najavljene su i nove baterije koje će imati kapacitet veći i do 30%. (Electrek, 2016)

Postoje 2 osnovna tipa konstrukcije električnih vozila (slika 2):

- Automobili standardne konstrukcije sa centralnim električnim motorom i baterijama najčešće smeštenim u podu vozila. Snaga se do točkova prenosi preko menjača,
- Automobil je opremljen motorom na svakom pogonskom točku i baterijama koje obezbeđuju energiju za pokretanje. (Manzetti, Mariasiu, 2015)



Slika 2. Osnovni tipovi konstrukcije električnih vozila (B – baterija, EC – kontrolna jedinica, T – Menjač, EM – električni motor, FD – diferencijal, HB – el. motori na točkovima)
Izvor: (Manzetti, Mariasiu, 2015)

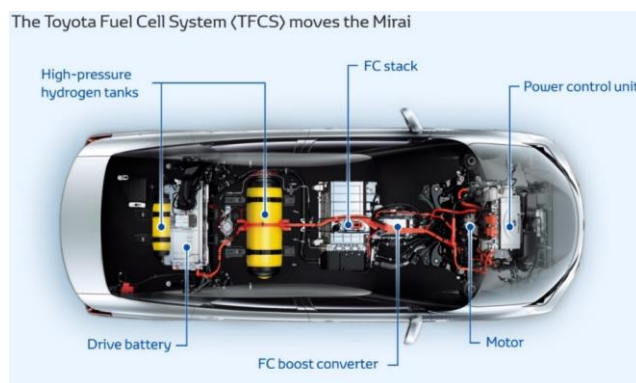
Produkt rada EV, isključivo u pogledu emisije štetnih gasova tokom vožnje je na nultom nivou. (Gupta et al. 2016) Naime, tzv. *Tank-to-Wheel* analiza obuhvata potrošnju energije, emisije izduvnih gasova i sl. u periodu od trenutka napunjenosti skladišta energije za pokretanje motora do kraja procesa vožnje (sledećeg punjenja).

U tom periodu, električna vozila ne emituju nikakve polutante, što je poželjno naročito u gusto naseljenim gradovima.

4.3 Vozila na gorivne ćelije (FCEV)

Vozila na gorivne ćelije (FCEV – *fuel cell electric vehicle*) su posebna vrsta električnih vozila koja umesto baterija koriste najčešće vodonične gorivne ćelije za napajanje električnog motora pogonskom energijom. Gorivna ćelija je elektrohemijska ćelija koja direktno pretvara hemijsku eneregiju goriva (u automobilu je to najčešće vodonik) u električnu preko elektrohemijske reakcije vodonika i kiseonika, bez procesa sagorevanja. (Jeong, Oh, 2002) Posmatrajući *Tank-to-wheel* analizu, vozila na vodonične ćelije mogu se klasifikovati kao nulti zagađivači životne sredine, s obzirom da je produkt opisane hemijske reakcije isključivo voda i toplota. Prednost vodonika kao energenta za pokretanje hemijskog procesa i stvaranje struje je u tome što je to jedan od najzastupljeniji elemenata u prirodi, koji može da se dobije iz prirodnog gasa, vode, biljaka itd.

Vozila na vodonične ćelije su tek nedavno počela serijski da se pojavljuju na tržištu. Najčešće je reč o hibridnim sistemima, u kome vodonične ćelije proizvode i skladište električnu energiju u baterije, odakle se šalje u motor. Prvi modeli u striktno ograničenom broju primeraka, počeli su da se nude na tržištu uz specijalne uslove kupovine 2002. godine. 2008. godine Honda je izbacila na tržište model Clarity koji je bio dostupan u svega nekoliko zemalja u ograničenom broju primeraka i mogao je isključivo da se kupi operativnim lizingom. Poslednji, a prvi model koji je u slobodnoj prodaji je Toyota Mirai. Toyotin sistem sastoji se od sklopa gorivnih ćelija, konvertora snage visokog kapaciteta (izlazne snage od 650V), rezervoara za vodonik pod visokim pritiskom (70 MPa), NiMH (Nikl-metal-hidridne) baterija i sinhronog motora naizmenične struje (slika 3). Domet je oko 500 km sa jednim punjenjem rezervoara, koje traje oko 3 minuta. (Toyota Motor Corporation, 2016)



Slika 3. Toyotin sistem vodoničnih gorivnih ćelija
Izvor: (Toyota Motor Corporation, 2016)

Toyotini inženjeri uspjeli su da reše glavne nedostatke kao što su bezbedno skladištenje vodonika, start u hladnim uslovima itd, dok je cena komponenata sistema znatno niža nego ranijih godina, uz tendenciju daljeg pada sa povećanje obima serijske proizvodnje.

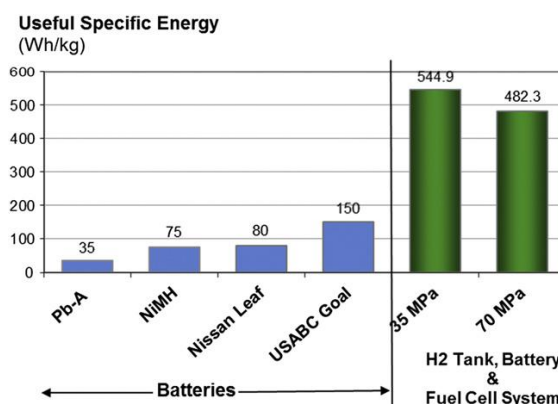
5. ANALIZA UTICAJA TEHNOLOGIJA ALTERNATIVNOG POGONA NA ŽIVOTNU SREDINU

Na osnovu prethodno navedenog, može se doneti nagli, površan i često pogrešan zaključak da su sva vozila sa alternativnim pogonom, pogotovo ona koja spadaju u tzv. vozila sa nultom emisijom, automatski i ekološki prihvatljivija od standardnih vozila. Zabluda može nastati posmatranjem isključivo količine emisije štetnih gasova u već pominjanim *Tank-to-Wheel* analizama. Ove analize uzimaju u obzir eksploatacione aktivnosti vozila, odnosno vrše ispitivanje energije i emisije štetnih gasova vezanih za upotrebu goriva tokom eksploatacije vozila. Analize obuhvataju brojne aktivnosti energetskog toka, od goriva u rezervoaru do pogonske sile na točkovima. Različite vrste pogonskih sistema imaju drugačiji energetski tok a samim tim i specifične efikasnosti svakog sistema. Međutim, pored *Tank-to-Wheel*, postoje i *Well-to-Tank* analize. Ovo je podjednako bitan deo koji obuhvata analize procesa vezanih za preradu sirovina i goriva. *Well-to-Tank* proces bavi se ocenjivanjem energetske efikasnosti i emisije, od vađenja i prerade sirovina do dostave goriva u rezervoar automobila. Ova dva procesa zajedno spadaju u *Well-to-Wheel* analize koje ispituju energetski i emisijski uticaj goriva tokom svog celokupnog životnog ciklusa. (Gupta et al. 2016) Upravo je sprovođenje *Well-to-Wheel* analiza ključno za donošenje merodavnih zaključaka o izdvajanju goriva odnosno tehnologije budućnosti. U nastavku rada biće prikazani rezultati nekih od značajnih analiza uticaja različitih pogonskih sistema na životnu sredinu.

Naročito interesantno istraživanje (Thomas, 2012) obuhvatilo je *Well-to-Wheel* analizu uticaja različitih pogonskih sistema u SAD, sa ciljem ispitivanja zacrtanih strategija smanjenja uticaja drumskog transporta na životnu sredinu u bliskoj budućnosti. Analize su obuhvatale ispitivanje podobnosti odnosno najveće efikasnosti u pogledu realnog smanjenja emisije štetnih gasova postepenom zamenom postojeće flote vozila vozilima sa nekim od ispitivanih sistema alternativnog pogona. Posebna pažnja bila je usmerena na razlike između Plug-in hibridnih električnih vozila (PHEV), električnih vozila opremljenih baterijama (BEV) i vozila na vodonične gorivne ćelije (FCEV).

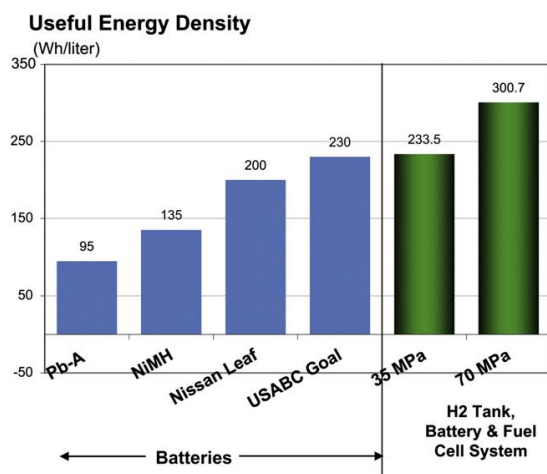
Kako bi ispitali i uporedili uticaj svake od navedenih tehnologija, prvobitno je bila neophodno sprovesti analizu tržišnog potencijala svake od njih, sa posebnim naglaskom na, mnogima favorizovana, električna vozila. Na osnovu toga može se proračunati buduća struktura toka odnosno kategorije vozila u kojima alternativne pogonske tehnologije mogu da zamene postojeća vozila sa SUS motorima. Razna istraživanja pokazuju da je oko 50% svih vozila u Evropi ili preveliko ili prelaze veće distance da bi komforno mogla da se opreme tehnologijom električnih vozila (BEV). Takođe su pretpostavili da će troškovi nabavke i eksploatacije više kategorije vozila (SUV) pokretana tehnologijom vodoničnih gorivnih ćelija (FFCEV), 2030. godine biti niža od troškova BEV ili PHEV. Naime, Litijum-jonske baterije koje najčešće pokreću savremena električna vozila su preteške i uzurpiraju dosta prostora da bi se njima opremala vozila visoke kategorije, koja prelaze veća rastojanja. Dodatak baterija bilo kom električnom vozilu radi produženja autonomije vožnje (maksimalnog dometa sa jednim punjenjem) je moguća ali to sa sobom povlači drastično dodavanje mase. Povećanje mase zahteva i izmene na konstrukciji vozila (kočnice, oslanjanje, karoserija itd.) pa je proračunato da je za svakih dodatih 100 kg baterija potrebno dodati još 60 kg u samoj strukturi vozila. (Thomas, 2012)

Masa svakog električnog automobila je ograničena korisnom specifičnom energijom (Wh/kg) kompletnog pogonskog sistema. Na slici 4 može se videti napredak baterija u pogledu korisne specifične energije tokom vremena i njihovo poređenje sa sistemom vodoničnih gorivnih ćelija sa rezervoarima od 35 i 70 MPa. Potrebno je ponovo napomenuti da su baterije sa jednom od najvećih vrednosti specifične energije danas dostupne na tržištu, ugrađene u modele Tesla automobila (S i P), sa odnosom od 140 Wh/kg, što je skoro u skladu sa dugotrajnim ciljevima USABC-a (američki konzorcijum tehnolojija baterija).



Slika 4. Korisna specifična energija baterija u poređenju sa sistemom za skladištenje gorivnih ćelija
Izvor: (Thomas, 2012)

Blaga prednost gorivnih ćelija ogleda se i korisnoj gustini uskladištene energije, koja pokazuje koliko prostora mora biti zauzeto na vozilu da bi se obezbedila zahtevana autonomija (slika 5).



Slika 5. Korisna energetska gustina skladištenja baterija i sistema gorivnih ćelija
Izvor: (Thomas, 2012)

Na osnovu svega opisanog (mase vozila, autonomije vožnje, korisne specifične energije i gustine itd.), odlučeno je da električna vozila (BEV) imaju potencijal da zamene male i srednje kategorije automobila, dok vozila na vodonične gorivne ćelije mogu zameniti sve kategorije putničkih automobila. Istraživanjem su obuhvaćena sva vozila pomenutih kategorija na putevima SAD.

Proračun emisije vozila vršen je na osnovu *Argonne National Laboratory GREET* modela, u kome se pored strukture toka, specifikacija pogonskih sistema, nalaze i podaci o elektro-energetskoj mreži SAD, odnosno informacije o izvoru dobijanja el. energije. (Thomas, 2012) Kao što je već rečeno, *Well-to-Wheel* analize posmatraju celokupan "životni ciklus" goriva, pa je neophodan podatak da li se gorivo dobija iz fosilnih odnosno obnovljivih izvora energije (ugalj, nafta, prirodni gas) ili iz ostalih obnovljivih izvora kao što su nuklearna energija, hidro energija itd. Na osnovu pomenutog modela moguće je proračunati emisiju CO₂ i ostalih polutanata alternativnih pogonskih sistema, od procesa proizvodnje goriva do njegovog iskorišćenja pri stvaranju energije za pokretanje vozila.

Utvrđeno je da se elektro-energetski sistem u SAD primarno zasniva na fosilnim gorivima. Čak 70,3% ukupno proizvedene struje u SAD (u 2010. godini) dobijeno je iz fosilnih goriva i to: 40,6% iz uglja, 23,1% iz prirodnog gasa i 1% iz nafte. Predviđa se da će se do 2035. godine ovaj procenat neznatno smanjiti na 68,6%. (Thomas, 2012)

Na osnovu pomenutih procenata korišćenja fosilnih goriva u elektro-energetskom sistemu u SAD, primenjen je pomenuti *GREET* model. Rezultati pokazuju da bi električna vozila (BEV) čije se baterije pune sa prosečne elektro mreže SAD, do 2035. godine emitovale oko 33% više štetnih gasova u odnosu na vozila sa vodoničnim gorivnim ćelijama, za koje se hidrogen dobija iz prirodnog gasa. Uočeno je takođe da bi Plug-in hibridna vozila (PHEV) emitovale od 5,8% do 9% više štetnih gasova u odnosu na klasična hibridna vozila (HEV) koja bi se kretala isključivo na benzin (samostalno punjenje baterija u toku vožnje, regenerativnim kočenjem itd.). (Thomas, 2012) Naravno, dobijene vrednosti emisije štetnih gasova mogu biti umanjene povećanjem zastupljenosti električne energije za punjenje baterija električnih vozila dobijene iz obnovljivih izvora. Takođe, vozila na vodonične gorivne ćelije mogu smanjiti sopstvenu emisiju dobijanjem vodonika iz obnovljivih izvora ili čak nus produkata industrije (hemijaska industrija itd. emituju vodonik i izbacuju ga u atmosferu). Električna vozila koriste i oko četiri puta više naftnih derivata (u procesu vađenja uglja, transporta itd.) u odnosu na vozila sa vodoničnim gorivnim ćelijama. Međutim, obe tehnologije koriste manje od 4% goriva u odnosu na prosečan automobil sa SUS motorom.

Sama električna vozila (BEV) bi, ukoliko zamene celokupnu klasu malih deo srednje klase vozila u SAD mogla da umanje emisiju štetnih gasova automobila i lakih teretnih vozila za oko 7,5% (uz postojeći procenat korišćenja fosilnih goriva za dobijanje el. energije na mreži SAD). Kada bi sva ostala vozila zamenili Plug-in hibridna vozila, postigla bi se ušteda od 25% emisije štetnih gasova i oko 67% potrošnje nafte. Ukoliko bi, sa druge strane, vozila sa gorivnim ćelijama zamenila sva vozila u SAD, postigla bi se ušteda od 40% u emisiji štetnih gasova i skoro 100% u potrošnji nafte (ukoliko bi vodonik i dalje bio dobijan iz prirodnog gasa). (Thomas, 2012)

Slično istraživanje sprovedeno je i u Indiji (Gupta et al. 2016) sa ciljem da odgovori na pitanje koja tehnologija je najefikasnija za smanjenje potrošnje goriva i emisije štetnih gasova na rastućem Indijskom tržištu, koje se svake godine uveća za preko 2,5 miliona putničkih automobila. Ispitivanja su vršena u skladu sa stilom vožnje primenjivim u toj zemlji radi dobijanja merodavnih rezultata koji su u skladu sa lokalnim uslovima. Sprovedena je *Tank-to-Wheel* analiza koja je obuhvatila čak 28 različitih konfiguracija automobila kompaktne klase (razni tipovi SUS motora, hibridna, električna, vozila na gorivne ćelije itd.) merodavne za tržište u Indiji. Kao i u slučaju istraživanja iz SAD, i ovde je primenjen simulacioni softver razvijen na matematičkom modelu istraživača. (Gupta et al. 2016)

Rezultati su pokazali da među SUS motorima najveću efikasnost ima dizel motor (25-32% *Tank-to-Wheel* efikasnosti). Najveću efikasnost očekivano su pokazala električna i vozila na vodonične ćelije. Hibridna vozila takođe ostvaruju znatne uštede u potrošnji goriva i emisiji štetnih gasova zahvaljujući efikasnijem radu motora, regenerativnom kočenju, gašenju motora prilikom zaustavljanja itd. Najefikasnijim se pokazao serijsko-paralelni hibridni sistem. Zaključeno je da hibridna vozila predstavljaju dobru polaznu osnovu za povećanje brige o životnoj sredini i potrošnji energenata, naročito jer su ovakvi alternativni pogonski sistemi zastupljeniji, a samim tim i jeftiniji od savremenih električnih ili vozila na gorivne ćelije. Hibridna vozila takođe postižu najveću efikasnost upravo u gradskim uslovima vožnje, što odgovara dominantnom stilu vožnje prisutnom u Indiji. (Gupta et al. 2016)

Još jedna od značajnih studija na ovu temu rađena je za 27 zemalja EU. (Pasaoglu et al. 2012) Analiza je zasnovana na ispitivanju potencijalnog razvoja tehnologija pogonskih sistema za putnička i laka teretna vozila u zemljama EU do 2050. godine. Obuhvatila je razvoj politika i strategija o dozvoljenim emisijama štetnih gasova vozila, ispitivanje primenljivosti bio-goriva, alternativnih pogonskih sistema. *Well-to-wheel* analizom obuhvaćeno je poređenje isplativosti uvođenja hibridnih (HEV, PHEV), električnih vozila (BEV), vozila na vodonične gorivne ćelije (FCEV) itd, kroz četiri pretpostavljena scenarija. Zaključeno je da je politikom uslovljenim poboljšanjem efikasnosti vozila sa SUS motorom uz korišćenje bio-goriva, moguće postići do 25% redukcije u emisiji CO₂ i ostalih polutanata do 2030. godine, u poređenju sa stanjem u 2010. godini. Ovaj procenat može biti i veći, u zavisnosti od primenjenog scenarija. Nakon 2030. godine i nemogućnosti daljeg usavršavanja postojećih tehnologija SUS motora i bio-goriva, uz istovremeno usavršavanje i pojeftinjenje električnih i vozila na vodonične ćelije, moguće je do 2050. godine ostvariti uštede od 35 do 57% emisije CO₂ i ostalih štetnih gasova. (Pasaoglu et al. 2012) Uz razvoj vozila potreban je i razvoj elektro-energetskog sistema koji bi se sve više oslanjao na obnovljive izvore energije i koji bi bio spreman da primi povećanu potražnju za el. energijom nakon omasovljavanja vozila na električni pogon.

6. ZAKLJUČAK

Na putevima širom sveta se, prema brojnim procenama, trenutno nalazi preko 1,2 milijarde vozila, uz predviđanja porasta na 2 milijarde u narednih 20-ak godina. Porast mobilnosti stanovništva, uz dominantno modalno učešće putničkih vozila posebno zabrinjava, ne samo po

pitaju efikasnosti i bezbednosti saobraćajnog sistema već i po pitanju uticaja na životnu sredinu. Ekološki problemi prouzrokovani procesima nastanka goriva i sagorevanjem u SUS motorima su sve veći, naročito u gusto naseljenim urbanim sredinama. Drumski transport odgovoran je za 22% ukupne emisije CO₂, rekordnih 40% NO_x, 12% partikularnih čestica (PM10, PM2.5) itd. To je navelo brojne zemlje da uvedu sve strožije politike i strategije smanjenja uticaja saobraćaja na životnu sredinu, pa je tako EU usvojila strategiju 2010. godine da se emisije CO₂ smanje za 20% do 2020. i za čak 80% do 2050. godine.

Kako bi se to postiglo, s obzirom na nemogućnost drastičnog unapređenja efikasnosti SUS motora koji se približavaju svom maksimumu, neophodno je analizirati alternativne tehnologije pogona i povećati njihovo učešće u saobraćajnom toku. Potrebno je sprovesti brojna ispitivanja uticaja pogonskih tehnologija na životnu sredinu, koje su relativno skoro počele masovnije da se pojavljuju na tržištu. Međutim, za ispitivanje njihovog uticaja nije dovoljno isključivo posmatranje emisijonih vrednosti tokom vožnje odnosno eksploatacije vozila, već je potrebno uključiti ceo "životni ciklus" energenta za pokretanje: od njegovog izdvajanja iz prirode i procesa proizvodnje, do transporta u skladištene kapacitete vozila i procesa pogona istog. Drugim rečima, neophodno je sprovesti tzv. *Well-to-Wheel* analize različitih tehnologija alternativnog pogona (hibridna vozila, električna vozila sa baterijama, vozila na vodonične gorivne ćelije itd.) jer jedino one mogu dati odgovor na pitanje koje je alternativno pogonsko gorivo odnosno gorivo budućnosti.

Brojna istraživanja pokazuju da vozila na alternativni pogon doprinose smanjenju emisija polutanata kao i smanjenju upotrebe naftnih derivata. U tome prednjače vozila sa električnim pogonom ali ne onoliko koliko se to možda očekuje. Njihovo ograničenje leži u baterijama za skladištenje energije, koje su i dalje teške, glomazne i ne obezbeđuju zahtevanu autonomiju. Efikasnost baterija se povećava, pa tako današnje litijum-jonske baterije mogu da obezbede autonomiju od oko 500 km (u povoljnim atmosferskim, terenskim i eksploatacionim uslovima) ali to uz sporo punjenje i dalje nije dovoljno za zamenu svih kategorija vozila ovom tehnologijom. Veliki uticaj na očuvanje životne sredine ogleda se i u elektro-energetskoj mreži određenog područja, pa ukoliko se većina el. energije dobija iz fosilnih odnosno neobnovljivih izvora, smanjenje emisije ne bi bilo drastično. Vozila na vodonične gorivne ćelije pokazuju slične odnosno nešto bolje rezultate emisije, imaju veću autonomiju i drastično kraće vreme punjenja. Međutim, konkretne vrednosti takođe zavise od izvora dobijanja vodonika, koji se mora dobijati iz prirodnog gasa ili nekih obnovljivih izvora kako bi ukupan ekološki

otisak ovih vozila bio bolji od električnih vozila sa baterijama. Hibridni sistemi predstavljaju dobro prelazno rešenje, između vozila sa SUS motorima i električnih ili vozila sa vodoničnim ćelijama i doprinose smanjenju emisije CO₂ i ostalih štetnih gasova zahvaljujući većoj efikasnosti motora, regenerativnom kočenju, smanjenju vremena rada motora, određene autonomije u električnom modu itd. Rezultati brojnih *Well-to-Wheel* analiza u SAD pokazuju da bi masovna primena alternativnih pogonskih tehnologija redukovala emisiju štetnih gasova od 28% za hibridna vozila, do skoro 47% za vozila na vodonične gorivne ćelije. Slična ispitivanja na u Evropi pokazuju da su do 2050. godine, u kojima bi masovno učešće alternativnih pogona bilo realno, moguće uštede u emisiji CO₂ od 35 do 57%.

Na kraju se može zaključiti da je potrebno podsticati veće učešće vozila na alternativni pogon, sa posebnim naglaskom na električna (BEV) i vozila na vodonične gorivne ćelije. Međutim, istovremeno je neophodno prilagođavanje elektro-energetskih sistema zemalja, kako povećanje zahteva za električnom energijom masovnijom pojavom električnih vozila ne bi doprinelo većem zagađenju vazduha štetnim gasovima. Ovo je moguće sprovesti prelaskom na obnovljive izvore energije za rad centrala (solarna energija, hidro energija, energija vetra itd.). Samo održivim sistemima i većom zastupljenošću vozila na alternativni pogon može se smanjiti evidentno štetan uticaj transporta na životnu sredinu.

LITERATURA

- [1] Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles - OICA (2016). Registration or sales of new vehicles, (on-line) available at: <http://www.oica.net/wp-content/uploads/total-sales-2016.pdf> (29.3.2017)
- [2] Van Mierlo. J., Magetto. G. (2007). Fuel Cell or Battery: Electric Cars are the Future, *Fuel Cells* (07), No:2, 165–173.
- [3] Pasaoglu, G., Honselaar, M., Thiel. C. (2012). Potential vehicle fleet CO₂ reduction and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe, *Energy Policy* 40, 404 – 421.
- [4] Thomas. S. (2012). How green are electric vehicles, *International journal of hydrogen energy* (37), 6053–6062.
- [5] Vestreng. V., Ntziachristos. L., Semb. A., Reis. S., Isaksen. I.S.A., Tarrason. L. (2009). Evolution of NO_x emissions in Europe with focus on road transport control measures, *Atmospheric Chemistry and Physics* (9), 1503–1520.
- [6] European Environment Agency (2014). Air pollutant emissions data viewer (LRTAP Convention), (on-line) available at: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/air-emissions-viewer-lrtap> (28.3.2017)
- [7] Gupta. S., Patil. V., Himabindu. M., Ravikrishna. R.V. (2016). Life-cycle analysis of energy and greenhouse gas emissions of automotive fuels in India: Part 1 – Tank-to-Wheel analysis, *Energy* (96), 684–698.
- [8] General Motors (2016). Technology, (on-line) available at: <https://www.gm.com/all-news-stories/technology.html> (25.6.2017)
- [9] Manzetti. S., Mariasiu. F. (2015). Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (51), 1004–1012.
- [10] Electrek (2016). Tesla Model 3's battery energy density, (on-line) available at: <https://electrek.co/2016/11/14/tesla-model-3-battery-energy-density-model-s/> (26.6.2017)
- [11] Jeong. K. S., Oh. B. S. (2002). Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle, *Journal of Power Sources* (105), 58 – 65.
- [12] Toyota Motor Corporation (2016). Innovation – environment technology, (on-line) available at: http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/ (26.6.2017)