

# Analiza alternativnih pogonskih goriva prema vrsti prijevoza

---

**Pucević, Stjepan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:824576>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-10**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

**ANALIZA STRUJE I VODIKA KAO POGONSKOG GORIVA  
PREMA VRSTI PRIJEVOZA**

**ANALYSIS OF ELECTRICITY AND HYDROGEN AS PROPELLANT  
ACCORDING TO THE TYPE OF TRANSPORT**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor: doc. dr. sc. Marijan Jakovljević

Student: Stjepan Pucević

JMBAG: 0135262326

Zagreb, rujan 2024.

Zagreb, 11. lipnja 2024.

Zavod: **Zavod za prometno planiranje**  
Predmet: **Ekologija u prometu**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 7459


Pristupnik: **Stjepan Pucević (0135262326)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Cestovni promet**

Zadatak: **Analiza alternativnih pogonskih goriva prema vrsti prijevoza**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno analizirati alternativna pogonska goriva poput struje i vodika sa stajališta energetske učinkovitosti. Isto tako potrebno je analizirati mogućnost primjene alternativnih goriva prema različitim modalitetima prijevoza te obrazložiti i usporediti njihove prednosti i nedostatke.

Mentor:



---

doc. dr. sc. Marijan Jakovljević

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

## **SAŽETAK:**

Smanjenje emisija štetnih plinova jedan je od glavnih ciljeva u sektoru transporta. Ono je ključno kada su u pitanju klimatske promjene i poboljšanje kvalitete zraka. Transport je jedan od najvećih izvora emisija stakleničkih plinova, posebno ugljikovog dioksida, koji doprinosi globalnom zatopljenju. S ciljem smanjenja emisija štetnih plinova, dolazi do razvitka različitih oblika alternativnih goriva, poput struje i vodika. Struja i vodik kao alternativna goriva koriste se zbog svoje nezavisnosti od fosilnih goriva, efikasnosti, te mogućnosti korištenja iz obnovljivih izvora energije. Potražnja za električnim automobilima sve je veća, dok se automobili na vodik kao pogonsko gorivo još razvijaju. Primjena struje u različitim vrstama transporta razvijenija je od primjene vodika, zbog njegovih nedostataka poput skladištenja i transporta. Analizirane su tehničke, ekonomske i ekološke prednosti i nedostaci vodika i struje kao pogonskih goriva u različitim vrstama prijevoza, uključujući gradski, pomorski i javni gradski prijevoz.

**KLJUČNE RIJEČI:** struja, vodik, električna vozila, gorive ćelije

## **SUMMARY:**

Reducing emissions of harmful gases is one of the main goals in the transport sector. It is crucial when it comes to climate change and improving air quality. Transport is one of the biggest sources of greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide, which contributes to global warming. With the aim of reducing harmful gas emissions, different forms of alternative fuels, such as electricity and hydrogen, are being developed. Electricity and hydrogen are used as alternative fuels because of their independence from fossil fuels, efficiency, and the possibility of using renewable energy sources. The demand for electric cars is increasing, while hydrogen cars as a fuel are still developing. The application of electricity in different types of transport is more developed than that of hydrogen, due to its disadvantages such as storage and transport. An analysis of the technical, economic and environmental advantages and disadvantages of hydrogen and electricity as fuels in different modes of transport, including urban, maritime and public urban transport has been carried out.

**KEYWORDS:** electricity, hydrogen, electric vehicles, fuel-cells

## SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Struja kao pogonsko gorivo</b> .....	<b>2</b>
2.1. Baterije električnih vozila .....	3
2.2. Infrastruktura i punjenje električnih vozila .....	4
2.3. Prednosti i nedostaci.....	7
<b>3. Vodik kao pogonsko gorivo</b> .....	<b>12</b>
3.1. Vodikova vozila s gorivim ćelijama .....	13
3.2. Vodikova vozila s unutrašnjim izgaranjem .....	14
3.3. Prednosti i nedostaci.....	15
<b>4. Primjeri primjene struje i vodika u osobnim vozilima</b> .....	<b>18</b>
4.1. Struja u osobnim vozilima .....	18
4.2. Vodik u osobnim vozilima.....	21
<b>5. Primjeri primjene struje i vodika u javnom gradskom prijevozu</b> .....	<b>23</b>
5.1. Primjena struje u javnom gradskom prijevozu .....	23
5.2. Primjena vodika u javnom gradskom prijevozu .....	25
<b>6. Primjeri primjene struje i vodika u pomorskom prometu</b> .....	<b>28</b>
6.1. Primjena struje u pomorskom prometu.....	28
6.2. Primjena vodika u pomorskom prometu .....	29
<b>7. Komparativna analiza vodika i struje kao pogonskog goriva</b> .....	<b>31</b>
<b>8. Zaključak</b> .....	<b>33</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>35</b>
<b>POPIS KRATICA</b> .....	<b>38</b>
<b>POPIS SLIKA, TABLICA I GRAFIKONA</b> .....	<b>39</b>

## 1. UVOD

Svjetska potreba za energijom raste eksponencijalno s povećanjem stanovništva i industrijalizacije. Tradicionalni izvori energije, kao što su fosilna goriva, ne samo da su ograničeni nego i značajno doprinose zagađenju okoliša i klimatskim promjenama. U tom kontekstu, alternativni izvori energije postaju ključni za održivu budućnost. Vodik se sve više prepoznaje kao jedno od najperspektivnijih alternativnih goriva zbog svoje čistoće i efikasnosti.

Onečišćenje zraka ozbiljan je javnozdravstveni problem u cijelom svijetu, posebno u industrijaliziranim zemljama i zemljama u razvoju. U industrijaliziranim zemljama i zemljama u razvoju emisije motornih vozila uvelike doprinose kvaliteti zraka u gradovima.

U ovom radu detaljno je analizirana i opisana tehnologija vozila koja koriste vodik i struju kao pogonsko gorivo. Analizirane su prednosti i nedostaci struje i vodika kao pogonskog goriva, te je analizirana njihova primjena kod različitih vrsta prijevoza s naglaskom na mogućnost poboljšanja ekološkog stanja i smanjenja emisija štetnih plinova. Uz uvod i zaključak rad je koncipiran u šest glavnih poglavlja.

U drugom poglavlju analizirana je struja kao pogonsko gorivo, baterije koje se koriste kod električnih vozila, infrastruktura za električna vozila, te prednosti i nedostaci električnih vozila.

U trećem poglavlju analiziran je vodik kao pogonsko gorivo, navedene su razlike između vodikovih vozila na gorive ćelije i vodikovih vozila s unutrašnjih izgaranjem. Također su opisane prednosti i nedostaci vodikovih vozila.

U četvrtom poglavlju navedeni su primjeri primjene struje i vodika u osobnim vozilima, prikazani su načini rada električnih i vodikovih vozila.

Peto poglavlje opisuje primjere primjena struje i vodika u javnom gradskom prometu, opisuje vozila u kojima se koriste te dvije vrste goriva, te su opisane razlike između tih vozila.

Šesto poglavlje navodi primjere primjena struje i vodika u pomorskom prometu, te su navedeni primjeri gdje se kod brodova, te na koji način koriste struja i vodik.

U sedmom poglavlju prikazana je komparativna analiza koja ima za cilj istražiti ključne aspekte struje i vodika kao pogonskih goriva, uključujući njihovu efikasnost, ekološki utjecaj, infrastrukturu, troškove i dugoročni potencijal, s ciljem bolje razumijevanja njihove uloge u tranziciji ka održivoj mobilnosti.

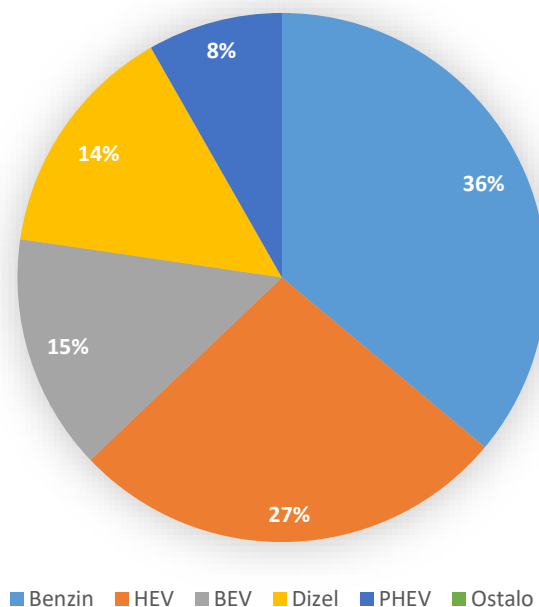
## 2. STRUJA KAO POGONSKO GORIVO

Struja kao pogonsko gorivo nudi niz prednosti u odnosu na tradicionalne izvore, kao što su nafta, uključujući smanjenje emisije štetnih gasova, niže operativne troškove i veći nivo energetske efikasnosti. Razvoj električnih vozila i njihova sve veća prisutnost na tržištu predstavljaju ključni element u transformaciji transportnog sektora. Emisije iz električnih vozila ovise o vrsti električne energije, baterija i materijala koji se upotrebljavaju za izradu baterija.

Električna energija kao alternativno gorivo počela se upotrebljavati već u 19. stoljeću kada su se počela pojavljivati prva električna vozila. Prva električna vozila koristila su jednokratne baterije koje bi se bacale nakon upotrebe, što nije bilo praktično. Otkrićem baterija koje imaju mogućnost punjenja broj električnih vozila se povećava.

Električni automobili predstavljaju važan dio promjene koja vodi ka održivom transportu. Oni koriste električnu energiju za pogon, umjesto fosilnih goriva, te nude niz prednosti u pogledu ekološke prihvatljivosti, efikasnosti i performansi.

Na grafu 1. prikazana je prodaja automobila na različite pogone za 2023. godinu. Iz grafa je vidljivo električni modeli na baterije postali treća najpopularnija vrsta automobila na kupce. Prodaja električnih vozila raste sve više u odnosu na prošle godine što se može vidjeti iz omjera prodaje baterijskih električnih vozila (*Battery Electric Vehicle* - BEV) i Plug-in hibridnog električnog vozila (*Plug-in Hybrid Electric vehicle* – PHEV). [10]



Grafikon 1. Prodaja automobila u Europi 2023.

Izvor: [10]

## 2.1. Baterije električnih vozila

Baterije u električnim vozilima ključne su za njihovu učinkovitost, domet i ukupne performanse. Trenutno, litij-ionske baterije dominiraju tržištem električnih vozila zbog svoje visoke energetske gustoće, dugog vijeka trajanja i relativne sigurnosti. Postoji i više vrsta baterija koje se razvijaju i koje bi mogle postati značajne u budućnosti.

Baterije su često najskuplji dio električnih vozila, što zapravo rezultira većom cijenom kupnje u usporedbi s vozilima s unutarnjim izgaranjem. Iako se cijene baterija smanjuju, još uvijek mogu biti prohibitivne za neke kupce. Teže su od spremnika za gorivo u vozilima s unutarnjim izgaranjem, što utječe na ukupnu masu vozila i dinamiku vožnje.

Baterije za električna vozila teže u prosjeku 300 kilograma, ali mogu biti i dvostruko veće za neke modele koje teže do 900 kilograma. Dodatna težina baterije poboljšava sigurnost, jer zbog njezinog postavljanja ispod šasije spušta se težište vozila. Samim time električna vozila manje se naginju pri zavojima pri većim brzinama ili u uvjetima kada je cesta mokra i skliska. [23]

Nisu standardizirane, a sastoje se od plastike, elektroničkih spojeva, te malih količina visokovrijednih materijala poput litija, kobalta, aluminijsa i nikla. [23]

Također je potrebno prilagoditi dizajn vozila kako bi se smjestile baterije, što može ograničiti prostor unutar vozila.

Baterije gube na performansama pri niskim temperaturama, što može smanjiti domet vozila i produžiti vrijeme punjenja. Kako bi se održala optimalna temperatura baterija neka vozila koriste sustave grijanja i hlađenja, što dodatno troši energiju i može smanjiti efikasnost vozila.

One su ključne kod električnih vozila, a litij-ionske baterije trenutno se najčešće upotrebljavaju zbog svoje visoke energetske gustoće i pouzdanosti. Ključni izazovi uključuju smanjenje troškova, povećanje sigurnosti i održivost proizvodnje i reciklaže baterija. Osim litij-ionskih baterija, predviđen je razvoj litij-umpornih i natrij-ionskih baterija.

Litij-ionske baterije su najčešće korištene baterije u električnim vozilima, prijenosnim računalima, pametnim telefonima i mnogim drugim uređajima zbog svoje visoke energetske gustoće, dugog vijeka trajanja i relativno niske stope samo pražnjenja. Rade na principu prijenosa litij-iona između anode i katode kroz elektrolit. Tijekom punjenja, litij-ioni se kreću od katode prema anodi i pohranjuju se unutar anode, dok se tijekom pražnjenja vraćaju natrag prema katodi, oslobađajući energiju koja se koristi za pogon uređaja ili vozila.

Neke od prednosti takve vrste baterija su visoka energetska gustoća, dug vijek trajanja i niska stopa samo pražnjenja. One mogu pohraniti više energije po jedinici mase i volumena u usporedbi s drugim tipovima baterija, što ih čini idealnim za prijenosne uređaje i električna vozila. Također mogu izdržati od nekoliko stotina do nekoliko tisuća ciklusa punjenja i



pražnjenja prije nego što se njihov kapacitet značajno smanji. Imaju visoku efikasnost pretvorbe energije, što podrazumijeva manje gubitaka tijekom punjenja i pražnjenja.

U usporedbi s drugim vrstama baterija imaju sposobnost brzog punjenja. Što podrazumijeva da vozači mogu brzo dopuniti bateriju na stanicama za brzo punjenje, a time se povećava praktičnost električnih vozila. Imaju relativno nisku stopu samo pražnjenja, što znači da zadržavaju veći dio svog kapaciteta i nakon dugog perioda neaktivnosti ili skladištenja. U usporedbi s drugim vrstama baterija relativno su lagane što doprinosi smanjenju ukupne mase vozila i poboljšava performanse i efikasnost.

Nedostatak je što su skuplje za proizvodnju u usporedbi s nekim drugim baterijama, iako cijene padaju kako tehnologija napreduje i proizvodni kapaciteti rastu. Proizvodnja litij-ionskih baterija zahtijeva rijetke i vrijedne metale poput litija, kobalta i nikla, čija eksploatacija može imati negativne ekološke i socijalne posljedice. Nedostatci podrazumijevaju rizik od zapaljenja ili eksplozije ako su izložene visokim temperaturama, fizičkom oštećenju ili nepravilnom punjenju, a njihove performanse mogu se smanjiti na vrlo niskim ili vrlo visokim temperaturama. Prosječni vijek im je od 10 do 20 godina. [20]

## 2.2. Infrastruktura i punjenje električnih vozila

Infrastruktura električnih vozila ključna je za širenje i prihvaćanje električnih automobila, kamiona, autobusa i drugih električnih vozila na tržištu. Infrastruktura obuhvaća različite komponente, uključujući punionice, električne mreže, usluge podrške, regulative i standarde. U tablici 1 prikazane su različite tehnologije za punjenje. Najrazvijenija je tehnologija punjenja sa izmjeničnom strujom. [14]

Tablica 1. Dostupne tehnologije za punjenje u Europi

BRZINA I NAČIN PUNJENJA	NAZIVNA SNAGA	PRIBLIŽNO VRIJEME PUNJENJA
<b>Sporo (izmjeničnom jednofaznom strujom)</b>	3 – 7 kW	7 – 16 sati
<b>Normalno (izmjeničnom trofaznom strujom)</b>	11 – 22 kW	2 – 4 sata
<b>Brzo (istosmjernom strujom)</b>	50 – 100 kW	30 – 40 minuta
<b>Ultra brzo (istosmjernom strujom)</b>	> 100 kW	< 20 minuta

Izvor: [14]

U Europi se najčešće koriste tri vrste punionica za električna vozila. Punionice koje se koriste su punionice razine 1 s izmjeničnom strujom, punionice razine 2 s izmjeničnom strujom, brze punionice s istosmjernom strujom, i ultra brze punionice. Svaka od ovih punionica ima specifične primjene i prednosti koje odgovaraju različitim potrebama korisnika električnih vozila. Najčešće se koriste punionice razine 2 s izmjeničnom strujom. One se nalaze na parkiralištima, trgovačkim centrima, uredskim zgradama i drugim javnim mjestima. Pružaju praktično punjenje dok korisnici obavljaju dnevne aktivnosti. [14]

Razvoj raznolike i pristupačne mreže punionica, uključujući kućne, javne i brze punionice, zajedno s integracijom obnovljivih izvora energije i pametnih mreža, pruža osnovu za održivi rast tržišta električnih vozila. Regulative, standardi i poticaji dodatno podržavaju ovu tranziciju, čineći električna vozila atraktivnom i ekološki prihvatljivom alternativom tradicionalnim vozilima na fosilna goriva.

Javne stanice za brzo punjenje omogućavaju vozačima da brzo dopune bateriju na putu. Ovi punjači koriste direktnu struju (*Direct current* - DC) i mogu napuniti bateriju do 80% kapaciteta za oko 30-60 minuta, zavisno od modela vozila. [14]

Javne stanice za standardno punjenje koriste izmjeničnu struju (*Alternating current* - AC) i obično su dostupne na parkiralištima, trgovačkim centrima i drugim javnim mjestima. Punjenje na ovim stanicama obično traje nekoliko sati. [14]

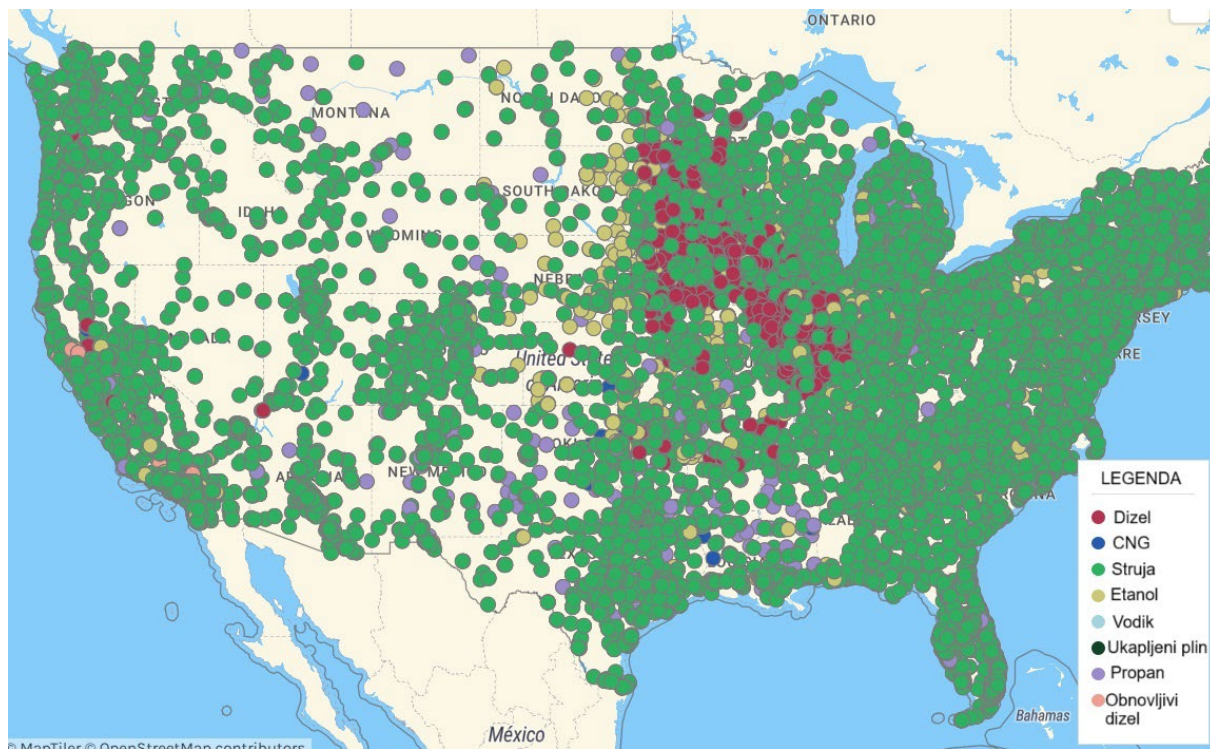
Investicije u proširenje mreže javnih punjača su ključne za podršku rastućem broju električnih vozila i povećanje njihove upotrebe. Harmonizacija i standardizacija punjača omogućava vozačima da koriste različite punjače bez problema, što je ključno za praktičnost električnih vozila. Napredak u tehnologiji baterija i punjača omogućava brže punjenje, veći domet i veću pouzdanost električnih vozila.



Slika 1. Punionica električnih automobila

Izvor: [1]

Nekoliko nedavnih studija [26] prikazuje kako u Sjedinjenim Američkim Državama postoji oko 140 000 javnih punjača za električna vozila raspoređenih na gotovo 53 000 stanica za punjenje, koje su još uvijek daleko brojčano nadmašene od 145 000 benzinskih postaja u zemlji.

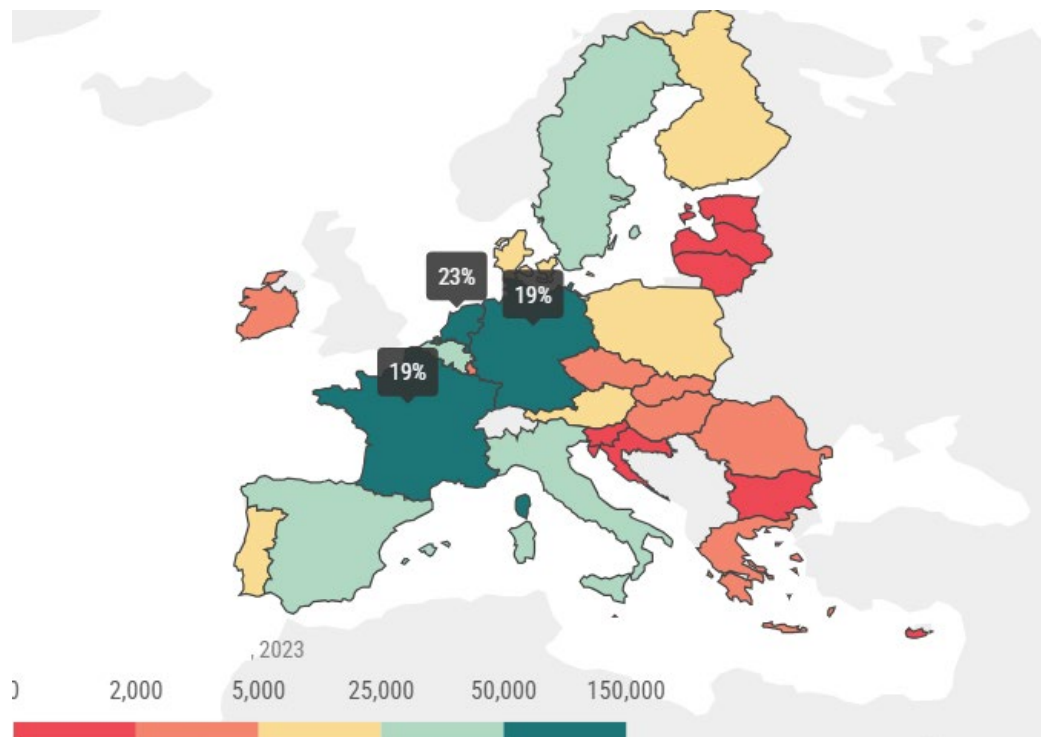


Slika 2. Stanice za punjenje električnih vozila u Sjedinjenim Američkim Državama

Izvor: [28]

Na slici 2 vidi se razlika između razvijenosti infrastrukture za električna vozila u odnosu na infrastrukturu za konvencionalna goriva. Također se vidi nerazvijenost infrastrukture za punjenje vodikovih vozila.

Europa posjeduje više od 500 000 javnih punionica, a cilj je dosegnuti 1 milijun mjesta za punjenje do 2025. godine [27]. Gotovo 61% infrastrukture razvijeno je u tri države, Nizozemskoj, Njemačkoj i Francuskoj. Najveći broj stanica za punjenje električnih vozila u Europi ima Nizozemska sa svojih preko 144 453 prema podacima iz 2023. godine. Drugo mjesto zauzima Njemačka sa svojih 120 625 punionica, dok je na trećem mjestu Francuska sa svojih 119 255 punionica kako je prikazano na slici 3. Ostalih 39% raspoređeno je u 24 država koje pokrivaju gotovo 80% površine Zemlje. Nizozemska s najvećim udjelom infrastrukture ima otprilike oko 52 puta više punionica od Rumunjske. [29]



Slika 3. Broj punionica u Europi

Izvor: [29]

### 2.3. Prednosti i nedostaci

Prednosti električnih vozila očituju se kroz niske troškove vožnje i održavanja, manje zagađenje okoliša u odnosu na fosilna goriva, niski nivo zagađenja bukom, te korištenje obnovljive energije.

Kada se električna energija proizvodi iz obnovljivih izvora kao što su solarna, vjetroelektrana, hidroenergija i geotermalna energija, ona može biti vrlo ekološki prihvatljiva. Električna vozila ne emitiraju ispušne plinove tijekom vožnje, što značajno smanjuje lokalno zagađenje zraka i emisije stakleničkih plinova.

Među najvažnijim prednostima su manji troškovi održavanja. Električni motori imaju znatno manje pokretnih dijelova u usporedbi sa motorom sa unutrašnjim izgaranjem. Motor sa unutrašnjim izgaranjem ima stotine pokretnih dijelova, dok električni motor ima samo nekoliko. Što znači da sa manjim brojem dijelova postoji manje komponenti koje se mogu pokvariti i zahtijevati zamjenu ili popravak.

Električna vozila ne koriste motorno ulje za podmazivanje dijelova motora, što smanjuje potrebu za redovnim promjenama ulja i zamjenom uljnih filtera, također ne koriste gorive filtere, jer nema sagorijevanja goriva. Koriste regenerativno kočenje koje pretvara kinetičku energiju u električnu energiju, što pomaže pri punjenju baterije. Takav sistem

smanjuje potrošnju kočionih pločica i diskova, što rezultira dužim intervalima između zamjena kočionih sustava.

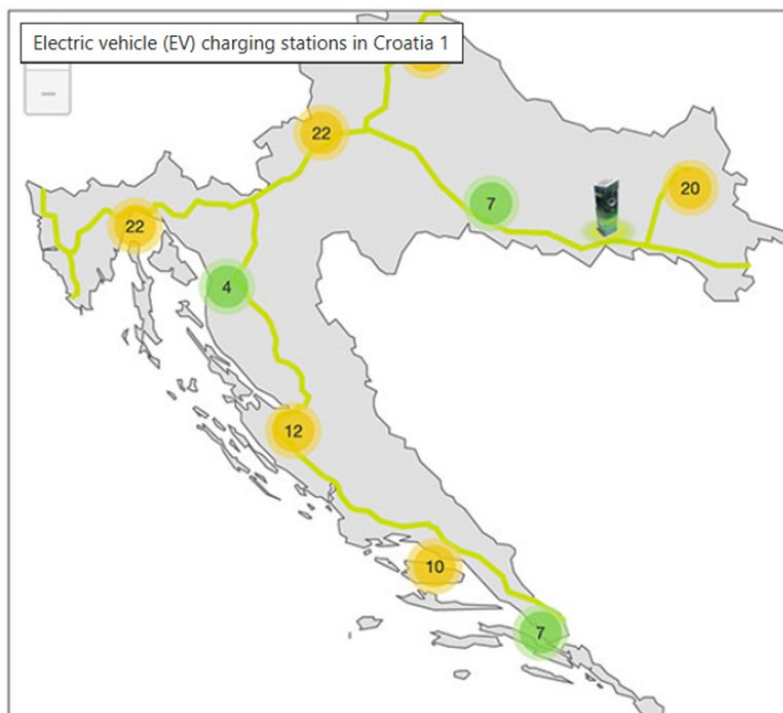
Unatoč mnogim prednostima, električna energija kao pogonsko gorivo za vozila također ima određene nedostatke koji ograničavaju njezinu širu primjenu. Pod nedostatke korištenja struje kao oblik alternativnog goriva ubrajaju se nerazvijenost infrastrukture, nedostatak povezan sa skladištenjem takvog oblika energije, troškovi baterija u električnim vozilima i slično.

Trenutne baterijske tehnologije imaju ograničen domet i vrijeme punjenja u usporedbi s punjenjem spremnika fosilnih goriva. Proizvodnja baterija zahtijeva rijetke metale poput litija, kobalta i nikla, čiji su resursi ograničeni i često povezani s ekološkim i socijalnim problemima. Također proizvodnja može biti energetska intenzivna i proizvesti značajne emisije ugljikovog oksida, iako su ukupne emisije obično niže nego kod konvencionalnih vozila tijekom njihovog životnog vijeka.

Pod nedostatak ubraja se ograničeni domet. Većina električnih vozila ima ograničen domet po jednom punjenju u usporedbi s vozilima s unutarnjim izgaranjem. Bez obzira što se tehnologija baterija neprestano poboljšava, vozila s električnim pogonom još uvijek mogu imati manji domet od benzinskih ili dizelskih vozila, što može biti problematično za dulja putovanja. Gubitak dometa zbog istrošenosti baterije jedan je od problema. Gubitak dometa nakon 160.000 prijeđenih kilometara mogao kreće se od 10% do 20%. [19]

Kada je riječ o infrastrukturi nedostatak stanica za punjenje može biti prepreka za usvajanje električnih vozila, posebno u ruralnim ili manje razvijenim područjima. Također bez obzira na činjenicu da brzo punjenje postaje sve uobičajenije, vreme punjenja može biti duže u usporedbi sa punjenjem goriva u tradicionalnim vozilima.

Na slici 4 prikazan je broj punionica električnih vozila u Republici Hrvatskoj. Iz slike se vidi su punionice nedovoljno razvijene što dovodi do problema kod duljih putovanja. Za dulja putovanja je iz tog razloga potrebno određeno planiranje, kako se baterija automobila ne bi ispraznila.



Slika 4. Broj punionica za punjenje električnih vozila na području Republike Hrvatske

Izvor: [25]

Za razliku od infrastrukture električnih vozila, benzinskih postaja za konvencionalna ima puno više kako je prikazano na slici 5. Iz tog razloga lakše je razviti infrastrukturu za vozila na vodik, jer postoji mogućnost upotrebe postojeće infrastrukture.



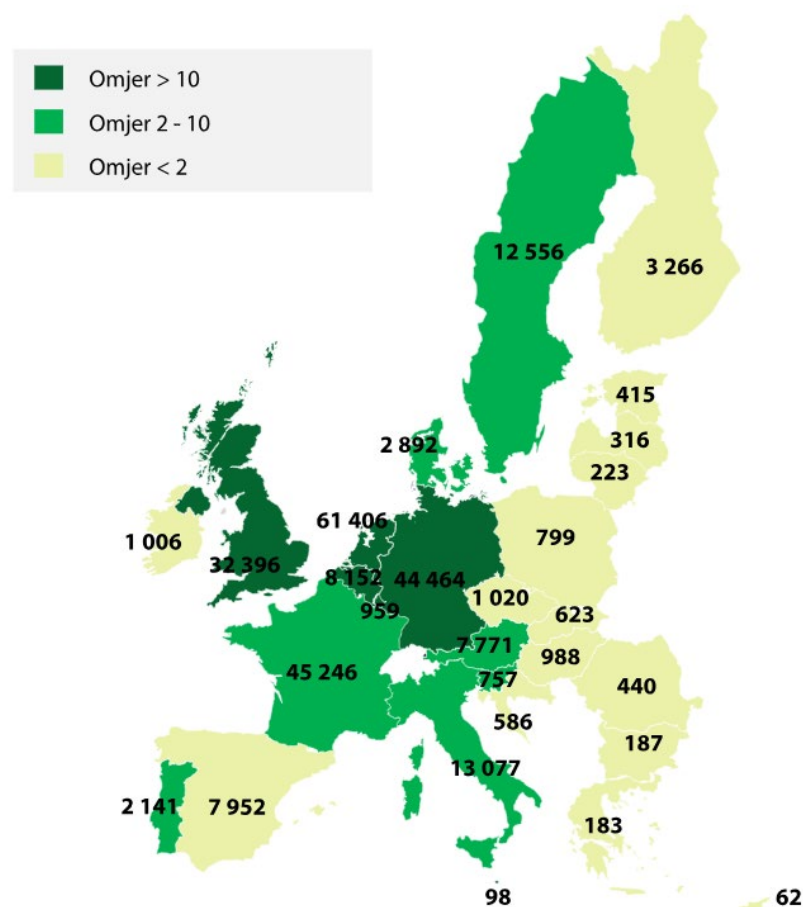
Slika 5. Benzinske postaje u Republici Hrvatskoj

Izvor: [31]

U Hrvatskoj se nalazi više od 700 javnih punionica za električna vozila, a svaka od njih ima nekoliko priključka za punjenje. Stanice se nalaze u blizini velikih parkirališta, benzinskih postaja, trgovačkih centra, hotela, autocesta i slično. [25]

Jedan od problema s kojim se suočava razvoj infrastrukture za električna vozila očituje se u priključcima za punjenje. Postoje različiti priključci za punjenje. Kako bi se omogućio razvitak infrastrukture potrebno je utvrditi koji će se priključci ugrađivati u punionice.

Punionice moraju biti opremljene sa barem dva tipa priključka, jedan standard tipa 2 za izmjeničnu struju i standard kombiniranog sustava za punjenje (istosmjerna struja). Većina proizvođača električnih automobila koristi standard tipa 2 za punjenje sa izmjeničnom strujom na europskom tržištu. Na slici 4 prikazan je broj javnih punionica diljem Europe, iz koje se vidi da je Hrvatska opremljena sa 586 javnih punionica. [14]



Slika 6. Broj i omjer javnih punionica na 100 km<sup>2</sup> kopnene površine

Izvor: [14]

Recikliranje baterija ubraja se u nedostatke električnih vozila jer ono može biti opasno. Neke od baterija poput litij-ionskih sadrže u sebi kemijske elemente kao što su litij, kobalt i nikal čije je odvajanje složen tehnološki proces jer baterije nisu standardizirane. Baterije su lako zapaljive, što može lako uzrokovati požare.

Proizvodnja, recikliranje i odlaganje baterija može stvarati dodatno zagađenje i imati negativne utjecaje na okoliš, posebno u slučajevima ako se ne primjenjuju odgovarajući postupci recikliranja i zbrinjavanja otpada.

Jedan od razloga recikliranja baterija je zaštita okoliša. Baterije sadrže niz materijala koji mogu biti štetni za ljude i okoliš. Kada se baterije nepravilno odlažu postoji mogućnost dolaska opasnih tvari u tlo i vode čime se ugrožava okoliš i zdravlje ljudi i životinja. Recikliranjem baterija dobivaju se sekundarne sirovine koje se mogu koristiti kod proizvodnje tih istih baterija, što smanjuje potrebu za primarnim sirovinama. [21] Nedostatak kod recikliranja je što metode recikliranja još uvijek nisu dovoljno efikasne i isplative. Prva tvornica u Europi koja je krenula sa recikliranjem nalazi se u Francuskoj, pod nazivom SNAM (*Société Nouvelle d’Affinage des Métaux* - SNAM). Tvornica reciklira otprilike oko 10 000 tona baterija godišnje, a učinkovitost recikliranja doseže do čak 93%. [22]

Požari uzrokovani električnim vozilima zbog specifičnih karakteristika baterija predstavljaju izazov za gašenje i mogu biti opasniji nego požari kod vozila na fosilna goriva. Glavni uzrok požara u električnim vozilima su litij-jonske baterije koje se koriste zbog svoje visoke energetske gustoće i relativno male težine.

Litij-jonske baterije mogu doći do termalne nestabilnosti kada su izložene ekstremnim temperaturama, fizičkom oštećenju ili prekomjernom punjenju što može dovesti do nekontroliranog porasta temperature, te na taj način dovesti do zapaljenja.

Također u baterijama može doći do kratkog spoja zbog fizičkih oštećenja, kvara u izradi ili ako zaštitni slojevi unutar baterije ne funkcioniraju ispravno. Kratki spoj generira visoku temperaturu što može zapaliti baterijske ćelije. Sudari ili mehanička oštećenja mogu izazvati oštećenja baterija što može dovesti do požara. Oštećenje bilo kojeg dijela baterije može uzrokovati požar.

Baterije u električnim vozilima mogu ponovo planuti nekoliko sati ili čak dana nakon inicijalnog gašenja požara, što predstavlja izazov kod gašenja požara. Litij-jonske baterije zahtijevaju specijalne tehnike gašenja popu upotrebe velike količine vode ili specijalnih kemikalija. Standardne metode gašenja požara mogu biti manje efikasne. Kada baterije gore ispuštaju veliku količinu štetnih plinova što može negativno utjecati i biti opasno za okolinu.

Električna vozila utječu negativno na infrastrukturu zbog veće težine u usporedbi sa vozilima na fosilna goriva. Ukupni utjecaj na infrastrukturu ovisi o različitim faktorima uključujući broj električnih vozila na putevima i kvalitetu same infrastrukture.

Teža vozila izazivaju veći pritisak na puteve što može ubrzati pojavu pukotina i oštećenja na cesti. Vozila poput kamiona i autobusa na električni pogon doprinose većem trošenju infrastrukture zbog svoje veličine i težine. Također na objektima poput mostova vrši se dodatno opterećenje što bi moglo zahtijevati veća ulaganja u održavanje infrastrukture.



### 3. VODIK KAO POGONSKO GORIVO

Vodik kao alternativno gorivo predstavlja obećavajuće rješenje za mnoge energetske izazove. Njegova čistoća, obnovljivost i svestranost čine ga ključnim u tranziciji ka održivoj energiji. Iako postoje izazovi u proizvodnji i distribuciji, kontinuirani tehnološki napredak i povećanje ulaganja u infrastrukturu mogu pomoći u prevladavanju tih prepreka. Vodik ima potencijal u budućem globalnom energetsom sustavu, smanjujući ovisnost o fosilnim gorivima i doprinosi očuvanju okoliša.

Kao takav on predstavlja jednu od opcija čistog goriva za smanjenje emisija motornih vozila. Vodik nije izvor energije već je sekundarni oblik energije koji se mora proizvoditi poput električne energije. Proizvodnja izgaranja vodika je čist proces, koji se sastoji od vode i male količine dušikovih oksida. Vodik ima posebna svojstva kao transportno gorivo što podrazumijeva veliku brzinu sagorijevanja, te visoki efektivni oktanski broj. Također nije toksičan i nema potencijala kod stvaranja ozona. Granice zapaljivosti u zraku veće su mu za razliku od metana i benzina. Vodik je postao potencijalno transportno gorivo, a proizvodi se centralno iz mješavine čistog ugljena i fosilnih goriva, nuklearne energije i velikih obnovljivih izvora energije.

Postoje različite vrste vodika poput sivog, plavog i zelenog. Sivi vodik proizvodi se iz fosilnih goriva, uglavnom prirodnog plina, putem procesa parnog reformna metana, te kao nusprodukt ispušta ugljikov dioksid, dok se plavi vodik također proizvodi iz fosilnih goriva, ali uz hvatanje i skladištenje ugljikovog IV oksida čime se smanjuju emisije stakleničkih plinova. Zeleni vodik ima veliki potencijal u smanjenju emisija stakleničkih plinova i usporavanju globalnog zatopljenja zbog činjenice da se najčešće dobiva elektrolizom vode korištenjem obnovljivih izvora energije, a samim time ne emitira stakleničke plinove. [2]

Uporabom alternativnih goriva očekuju se pozitivni učinci poput stvaranja novih radnih mjesta u proizvodnji, postavljanje infrastrukture za alternativna goriva, razvoj gospodarstva, te među najvažnijima smanjenje emisija ugljikovog oksida i ostalih štetnih plinova.

Vodik se kao alternativno gorivo primjenjuje u gorivim ćelijama i kao direktno samozapaljivo gorivo. On skupa sa električnom energijom i amonijakom čini alternativno gorivo s nultom stopom emisije. Goriva ćelija je elektrokemijski uređaj koji služi za pretvorbu kemijske energije iz vodika direktno u električnu energiju, toplinu i vodu. Postoji nekoliko vrsta gorivih ćelija, u transportu koristi se gorivi članak s polimernom membranom kao elektrolitom (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* - PEM). [2]

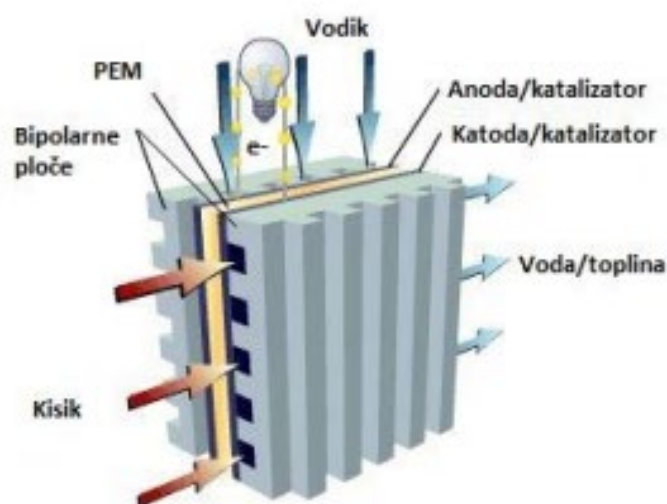
Vodik se koristi za pogon kamiona i autobusa na sličan način kao i kod automobila. Gorive ćelije pružaju dug domet i kratko vrijeme punjenja, što je važno za teška vozila koja trebaju raditi dugi vremenski period bez dugih pauza za punjenje. Postoje inicijative za korištenje vodika u avionima, tramvajima i vlakovima.

Vlakovi na vodik koriste se u nekim dijelovima Europe, dok se istražuju mogućnosti za vodik kao gorivo za avione kako bi se smanjila emisija iz zračnog prometa. U Hrvatskoj se vlakovi na vodikov pogon trenutno ne koriste, ali postoji interes i potencijal za njihovu upotrebu u budućnosti.

### 3.1. Vodikova vozila s gorivim ćelijama

Kada vodik i kisik u plinskom stanju dođu u kontakt i aktiviraju, oni reagiraju i spajaju se u vodu, te na taj način oslobađaju energiju. Gorivi članci su djelotvorni pretvarači energije, bez pokretnih dijelova, te bez stvaranja buke. Sastoje se od dviju elektroda anode i katode između kojih se nalazi čvrsti ili tekući elektrolit kako je prikazano na slici 7. Na anodi oksidira gorivo, dok se na katodi drugi element reducira zahvatom elektrona koji su proizvedeni na anodi. Elektroni koji su proizvedeni oksidacijom goriva, odvoje se od anode vanjskim krugom vodiča preko trošila do katode. U samom procesu nema izgaranja, već vodik oksidira elektrokemijski. Tijekom oksidacije atomi vodika reagiraju s atomima kisika i na taj način tvore vodu. [5]

Vodik se koristi u vozilima koja koriste gorive ćelije za proizvodnju električne energije koja pogoni elektromotor. Takva vozila su poznata kao električna vozila na gorive ćelije (*Fuel Cell Electric Vehicles* - FCEV). To su vozila s električnim pogonom koji struju koriste iz sustava vodikovih gorivih ćelija. Električna energija nije uskladištena u akumulatoru, već se proizvodi u vozilu iz vodika. Nedostatak takvog načina rada je potreba za velikim spremnicima komprimiranog vodika pod visokim tlakom. Tehnologija gorivih ćelija na vodik još uvijek je u fazi razvoja i suočava se s tehničkim izazovima kao što su trajnost, efikasnost i troškovna konkurentnost. Potrebna su daljnja istraživanja i inovacije kako bi se ove tehnologije unaprijedile. Gorive ćelije skupe su za proizvodnju jer uključuju ručnu obradu, a cijena vodikovog goriva znatno je veća od cijene dizelskog goriva. [5]



Slika 7. PEM gorivi članak

Izvor: [5]

Vozilo na vodikove gorive ćelije (*Hydrogen Fuel Cell Vehicle* - HFCV) koristi istu vrstu električnog motora za pogon kao i električni automobil na baterije. Napaja ga sklop gorivih ćelija u kojem čisti vodik prolazi kroz membranu kako bi se spojio s kisikom iz zraka. Kao takvo vozilo na gorive ćelije tehnički je serijski hibrid, zbog čega se ponekad klasificira kao hibridno električno vozilo na gorive ćelije (*Fuel-Cell Electric Hybrid Vehicle* - FCHEV). [15]

Kao i električna vozila, električna vozila na gorive ćelije koriste električnu energiju za pogon elektromotora. Za razliku od drugih električnih vozila, ona proizvode električnu energiju koristeći gorivu ćeliju koju pokreće vodik, umjesto da crpe električnu energiju samo iz baterije. Učinkovitiji su od konvencionalnih vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem i ne proizvode štetne emisije iz ispušnih cijevi, ispuštaju samo vodenu paru i topli zrak. Koriste pogonski sustav sličan onome kod električnih vozila, gdje se energija pohranjena kao vodik pretvara u električnu energiju pomoću gorive ćelije. Za razliku od konvencionalnih vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem, ovakav tip vozila ne proizvodi štetne emisije iz ispušnih cijevi. [15]

### **3.2. Vodikova vozila s unutrašnjim izgaranjem**

Razlika između vodikovih vozila s unutarnjim izgaranjem i vodikovih vozila s gorivim ćelijama je u načinu na koji se koristi vodik za proizvodnju energije za pokretanje vozila. Vodikova vozila s unutarnjim izgaranjem koriste vodik kao gorivo umjesto tradicionalnih fosilnih goriva kao što su benzin ili dizel. Takva vrsta tehnologije ima svoje prednosti i nedostatke. Vodik je vrlo zapaljiv i eksplozivan plin, što zahtijeva posebne mjere sigurnosti kako bi se spriječile prometne nesreće. Neki proizvođači automobila razvili su vozila koja koriste vodik, no većina tih vozila koristi gorive ćelije umjesto motora s unutrašnjim izgaranjem. Kod ove tehnologije energija se proizvodi sagorijevanjem vodika u motoru. Za razliku od vodikovih vozila s gorivim ćelijama, ova tehnologija ima nižu efikasnost jer se dio energije gubi u procesu izgaranja, a također može doći i do stvaranja manjih količina dušikovog oksida zbog visoke temperature izgaranja. [3]

Vodikova vozila s unutarnjim izgaranjem (*Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle* - HICEV) koriste modificirani motor s unutarnjim izgaranjem za sagorijevanje vodika umjesto tradicionalnih fosilnih goriva. Ključne komponente kod ovakve tehnologije su motor s unutarnjim izgaranjem, sustav za skladištenje vodika, sustav za ubrizgavanje goriva, te sustav za paljenje.

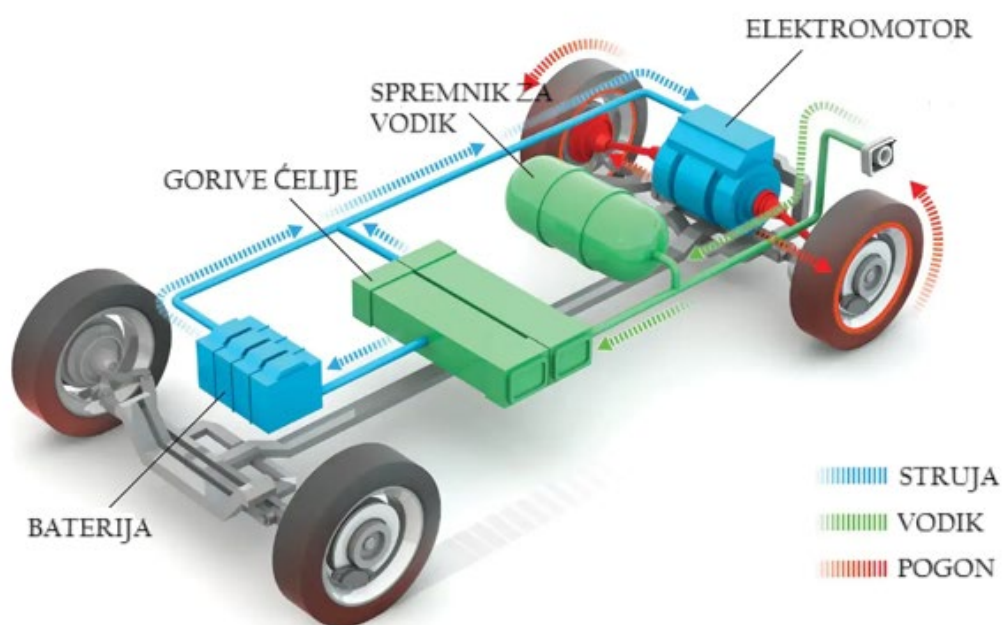
Sustav za skladištenje vodika mora imati visokotlačne spremnike unutar vozila, te specijalizirani sustav za ubrizgavanje vodika u cilindre motora. Također takva tehnologija mora sadržavati modificirani sustav za paljenje koji može zapaliti vodik pri odgovarajućim uvjetima.

Vodik se dovodi iz spremnika pod visokim tlakom u sustav za ubrizgavanje goriva, te se miješa sa zrakom u usisnom razvodniku ili direktno u cilindrima motor. Omjer mješavine vodika i zraka mora biti točno kontroliran kako bi se osigurala učinkovita i sigurna izgaranja. Nakon toga mješavina vodika i zraka komprimira se u cilindrima motora tijekom kompresijskog takta. Svjećice ili drugi sustavi paljenja zapaljuju komprimiranu smjesu vodika i

zraka, uzrokujući izgaranje koje proizvodi toplinu i pritisak koji tjeraju klipove prema dolje, stvarajući mehaničku energiju koja se prenosi na pogonski sklop vozila. Od ispušnih plinova ova tehnologija proizvodi male količine dušikovog oksida. [15]

Neki od tehničkih izazova ove tehnologije su kontrola izgaranja, hlađenje motora, materijali koji se koriste, te sigurnost. Vodik gori brže od benzina čime se zahtijeva precizna kontrola procesa izgaranja kako bi se spriječilo preuranjeno izgaranje. Proces izgaranja sličan je procesu izgaranja drugih visoko temperaturnih goriva poput benzina, dizela ili prirodnog plina. Zbog visoke temperature izgaranja važno je da sustavi za hlađenje budu prilagođeni za rad s vodikom. Materijali koji se koriste u motorima moraju biti otporni na visoke temperature i koroziju uzrokovanu vodikom.

Na slici 8 prikazani su dijelovi sustava vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem na vodik, iz koje se može vidjeti kombinacija baterije s elektromotorom.



Slika 8. Princip rada vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem na vodik

Izvor: [15]

### 3.3. Prednosti i nedostaci

Jedan od najvećih izazova je transport vodika u industriji vodika. Proizvodnja vodika često se nalazi na udaljenim područjima bogatim obnovljivim izvorima energije te ga je potrebno transportirati do industrijaliziranih i gusto naseljenih područja u kojima postoji potražnja za vodikom. Visoki troškovi transporta vodika znatno povećavaju njegove ukupne troškove što predstavlja izazov za njegovu komercijalnu održivost. Manjak razvoja infrastrukture stanica za punjenje vodikom također je jedan od nedostataka.

U vozilima s gorivim ćelijama veliki izazov je skladištenje vodika, zbog njegove male gustoće. U ćelijama goriva vodik iz spremnika spaja se s kisikom iz zraka i pritom proizvodi

električnu energiju, a u atmosferu se ispušta vodena para. Vodik se može skladištiti u tekućem stanju, u plinovitom stanju, na površinama krutih tvari ili unutar krutih tvari. Danas ne postoji veliki broj skladišta vodika. Nedostatak se očituje kroz ćelije koje su složene i osjetljive na čistoću vodika, zbog čega zahtijevaju rad na niskim temperaturama, što može dovesti do otežanosti rada u hladnijim klimama.

Jedna od značajnijih prednosti vozila s vodikovim gorivim ćelijama je mogućnost korištenja infrastrukture za gorivo koja je slična konvencionalnim vozilima. To značajno doprinosi uštedi troškova prilikom razvoja infrastrukture jer postoji mogućnost da bi se električna vozila na gorive ćelije mogla puniti gorivom na postojećim stajalištima. Također imaju duži domet od električnih vozila na baterije, što ih čini pogodnim za duže vožnje i manje zavisnim od infrastrukture za punjenje. Velika prednost u odnosu na električna vozila je njihovo vrijeme punjenja, koje je kraće u odnosu na električna vozila. Proizvode samo vodenu paru kao nusprodukt, što znači da ne emitiraju štetne plinove poput ugljikovog dioksida i ostalih čestica koje zagađuju zrak što ih čini ekološki prihvatljivim i značajno smanjuje njihov utjecaj na klimatske promjene.

Vozila s vodikovim motorima s unutrašnjim izgaranjem imaju nekoliko prednosti, iako su manje razvijena u usporedbi s vozilima na vodikove gorive ćelije. Jedna od prednosti vodikovih motora s unutrašnjim izgaranjem je što se mogu koristiti u postojećim tehnologijama motora s unutrašnjim izgaranjem uz relativno manje modifikacije. To omogućava proizvođačima automobila da koriste već postojeće proizvodne linije i tehnologije, što može smanjiti troškove razvoja u usporedbi s potpuno novim sistemima poput gorivih ćelija. Takva vozila nisu potpuno bez emisija, ali emisije koje ispuštaju su značajno manje u usporedbi s klasičnim vozilima na benzin i dizel. U odnosu na vozila s vodikovim gorivim ćelijama otporniji su u teškim uvjetima, zbog osjetljivosti ćelija na čistoću vodika.

Također nedostatak je proizvodnja vodika koja može biti skupa i neefikasna. Većina vodika proizvodi se iz fosilnih goriva najviše iz prirodnog plina procesom koji se zove parna reformacija metana. Takav proces troši puno energije i emitira velike količine ugljikovog dioksida što onečišćuje okoliš.

Zeleni vodik proizvodi se procesom elektrolize pri kojemu se voda razdvaja na vodik i kisik korištenjem električne energije iz obnovljivih izvora energije kao poput solarne energije, energije vjetra ili hidroenergije. Takav proces je potpuno čist jer ne emitira štetne plinove, pa se zeleni vodik smatra važnim elementom u tranziciji ka održivoj energetskej budućnosti. Električna energija korištena u procesu mora dolaziti iz obnovljivih izvora kako bi se zeleni vodik smatrao održivim, ako se energija proizvodi iz fosilnih goriva vodik ne bi bio zeleni već bi imao štetan utjecaj na okoliš.

Proizvodnja zelenog vodika je skuplja od drugih oblika zbog visokih troškova proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora i efikasnosti elektrolizatora. Nedostatci zelenog vodika su visoki troškovi proizvodnje i nedostatak razvijene infrastrukture koji ograničavaju njegovu primjenu.

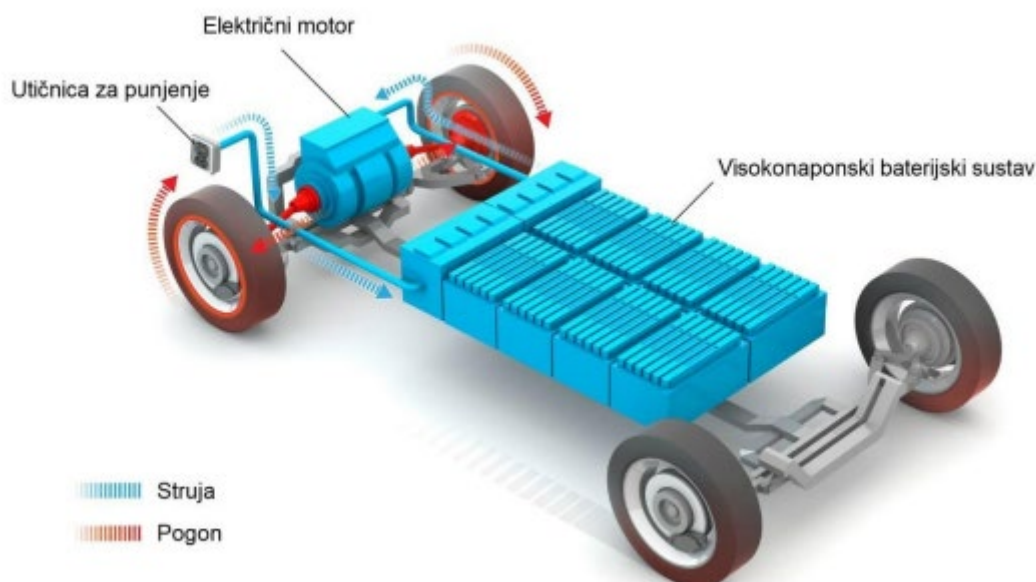
Infrastruktura za zeleni vodik je još uvijek nerazvijena zbog kombinacije tehničkih, ekonomskih i logističkih izazova kao i zbog potrebe za značajnim ulaganjima i prilagođavanjem postojećih energetske i transportnih sustava.

## 4. PRIMJERI PRIMJENE STRUJE I VODIKA U OSOBNIM VOZILIMA

Korištenje električne energije i vodika kao pogonskih goriva za vozila predstavlja dva različita pristupa k održivom transportu. Postoji mnogo prednosti i nedostataka kod obje vrste pogonskih goriva. Električna vozila su trenutno sigurniji izbor zbog razvijenije infrastrukture, visoke efikasnosti i nižih operativnih troškova. Vodikova vozila nude prednosti u pogledu brzine punjenja i dometa, ali se suočavaju s izazovima u pogledu proizvodnje vodika i infrastrukture za punjenje. Obje tehnologije doprinose smanjenju emisija stakleničkih plinova, te prijelazu na održiviji transportni sustav. Električna energija može biti proizvedena iz raznih izvora, uključujući obnovljive izvore, nuklearnu energiju i fosilna goriva, što povećava energetske sigurnost, dok se vodik proizvodi različitim metodama korištenjem različitih resursa.

### 4.1. Struja u osobnim vozilima

Struja u osobnim vozilima ima široku primjenu, kako u tradicionalnim vozilima s unutarnjim izgaranjem, tako i u električnim vozilima. U osobnim vozilima koji su pogonjeni strujom, ona je glavni izvor pogona, pretvara električnu energiju iz baterije u mehaničku za kretanje vozila. Također se elektromotor može kombinirati s motorom s unutarnjim izgaranjem kako je prikazano na slici 9, omogućujući različite načine rada poput hibridnog. U baterijskom sustavu ona je glavni izvor energije za pogon i napajanje električnih komponenti kod električnih vozila i hibrida. [4]

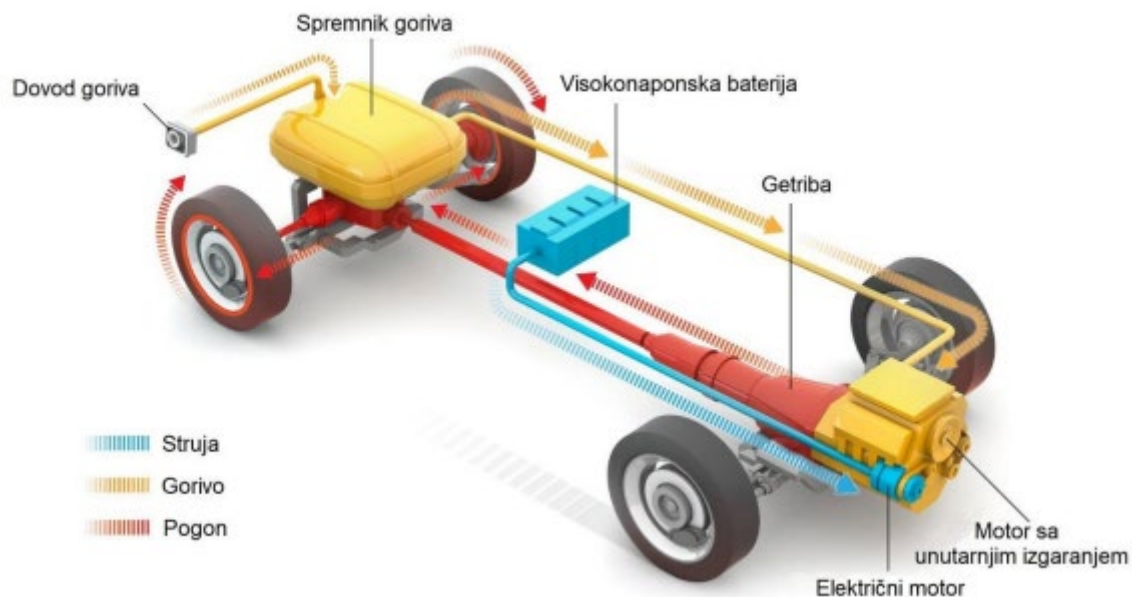


Slika 9. Princip rada električnog vozila

Izvor: [6]

Glavni sklop kod električnih vozila je elektromotor. To je uređaj koji pretvara električnu energiju u mehaničku energiju. Radi na osnovu interakcije između magnetskog polja i električne struje. Kada električna struja prolazi kroz zavojnicu unutar magnetskog polja, stvara se sila koja uzrokuje rotaciju zavojnice, a time i rotora motora. Prednosti korištenja elektromotora u osobnim automobilima su visoka učinkovitost, niski troškovi održavanja zbog manje pokretnih dijelova, preciznija kontrola pomoću naprednih elektroničkih kontrolera, te dobar utjecaj na okoliš zbog nulte emisije štetnih plinova.

Hibridna električna vozila (*Hybrid Electric Vehicles* - HEV) kombiniraju motor s unutarnjim izgaranjem i električni motor s baterijom kako bi se poboljšala učinkovitost potrošnje goriva i smanjile emisije. Takvo vozilo skladišti električnu energiju koja se koristi za napajanje električnog motora. Također ima sustav regenerativnog kočenja koji pretvara kinetičku energiju vozila tijekom kočenja u električnu koja se vraća natrag u bateriju. [6] Takav sustav upravlja kombinacijom rada motora s unutarnjim izgaranjem i električnog motora kako bi se postigla optimalna učinkovitost i performanse, što je prikazano na slici 10.



Slika 10. Princip rada hibridnog električnog vozila

Izvor: [6]

Kod vozila s unutarnjim izgaranjem struja se koristi u akumulatoru koji je glavni izvor električne energije kada motor ne radi, te alternatoru koji proizvodi električnu energiju kada motor radi, puni akumulator i napaja električne komponente vozila.

Razlika između hibridnih električnih vozila i električnih vozila je u njihovim pogonskim sustavima, načinu korištenja energije, dometu, emisijama, infrastrukturi za punjenje i troškovima.



Korištenjem električne energije kao pogonskog goriva smanjuje se ovisnost o fosilnim gorivima i osigurava stabilnija i održivija energetska budućnost. Električna energija kao pogonsko gorivo za vozila nudi brojne prednosti koje uključuju smanjenje emisija i onečišćenja, niže operativne troškove, visoku efikasnost, bolje performanse, te praktičnost i jednostavnost upotrebe. Ove prednosti čine električna vozila dobrom alternativom tradicionalnim vozilima na fosilna goriva i ključnim elementom u tranziciji prema održivom transportnom sustavu.

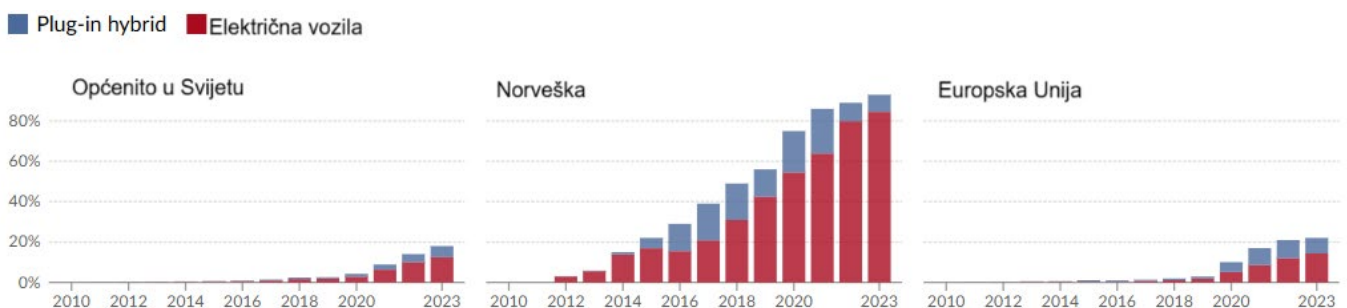
Također pod električna vozila spadaju plug-in hibridna vozila. Takva vozila koriste više različitih izvora energije. Mogu raditi s motorom s unutarnjim izgaranjem kao obično vozilo ili pomoću elektromotora i baterije poput električnog vozila. Naziva se plug-in hibrid jer se mora priključiti na kabel za punjenje baterije što mu daje određenu količinu dometa s nultom emisijom, za koji postoji mogućnost vožnje bez upotrebe motora. [33]

Nakon što se baterija isprazni motor se neprimjetno uključuje i ponovno se vraća na sustav pogonjen konvencionalnim gorivom. Pogodni su za kratke udaljenosti jer imaju sve prednosti električnog automobila bez nedostatka punjenja kod duljih putovanja.

Funkcioniraju na način da se napune pomoću posebnog kabla koji se spaja u posebnu utičnicu. Nakon završetka punjenja baterija daje određenu količinu električnog dometa bez ovisnost vozila da koristi motor kao pogon. S punom baterijom domet im je oko 30 kilometara do 100 kilometara bez potrebe za punjenjem, ovisno o modelu vozila. [33]

Pogodni su za urbana područja zbog male količine štetnih plinova koje ispuštaju i koji mogu utjecati na okolinu. U električnom načinu rada šalju električnu energiju iz svoje baterije u motor kako bi se osigurao pogon.

Na slici 11 vidi se kako se prodaja plug-in vozila povećava od 2010. godine. Zemlja sa najvećom prodajom takvih vozila je Norveška, koja ima skoro tri puta veću prodaju od Europske Unije.

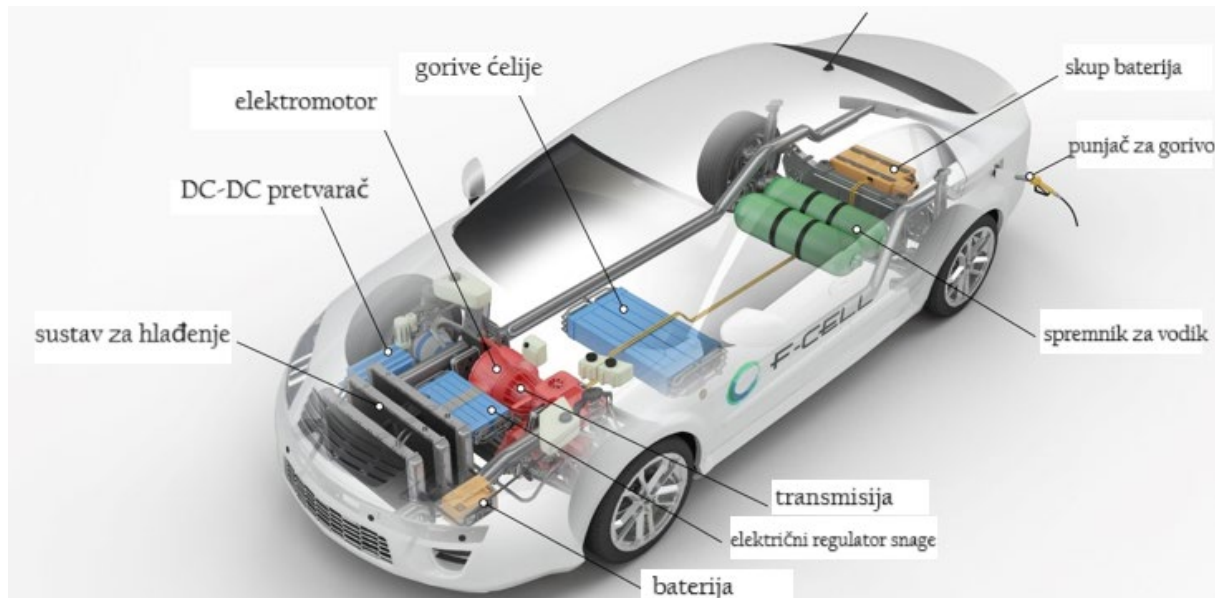


Slika 11. Prodaja Plug-in hibridnih vozila od 2010. do 2023.

Izvor: [34]

## 4.2. Vodik u osobnim vozilima

Vodikova vozila na gorive ćelije se pokreću čistim vodikovim plinom pohranjenim u spremniku na vozilu, odnosno koriste struju iz sustava vodikovih gorivih ćelija. Takva vozila opremljena su drugim naprednim tehnologijama za povećanje učinkovitosti, kao što su sustavi regenerativnog kočenja koji hvataju energiju izgublenu tijekom kočenja i pohranjuju je u bateriju. Na slici 12 prikazani su dijelovi električnih vozila na gorive ćelije koje koriste struju iz sustava vodikovih gorivih ćelija.



Slika 12. Princip rada električnih vozila na gorive ćelije

Izvor: [16]

Vodikova vozila na gorive ćelije imaju usvojen princip rada tradicionalnih motora i prilagođavaju ih kako bi koristili vodik kao primarni izvor goriva. Rad vozila počinje ubrizgavanjem vodikova goriva u komoru za izgaranje motora. Nakon toga vodikovo gorivo pomiješa se sa zrakom u komori za izgaranje. Postizanje idealne mješavine goriva i zraka ključno je za učinkovito izgaranje. Precizna kontrola ove mješavine osigurava optimalnu proizvodnju energije i kontrolu emisije. [24]

Nakon dobro pripremljene smjese započinje proces izgaranja. To uključuje uvođenje iskre za paljenje smjese, što pokreće izgaranje. Svojstva vodika poput visoke temperature paljenja i velike brzine izgaranja u usporedbi s benzinom, zahtijevaju modifikacije sustava paljenja radi preciznog mjerenja vremena. [24]

Zapaljena smjesa vodika i zraka podvrgava se kontroliranoj eksploziji unutar cilindara motora. Ovaj proces vrši silu na klipove motora, pokrećući ih u klipnom pokretu. Kretanje je iskorišteno za okretanje radilice motora, koja je povezana s kotačima vozila. [24]

Rotacijska energija koju stvara radilica koristi se za proizvodnju mehaničke snage. Snaga se prenosi na kotače vozila, pokrećući ga, dok izlazna snaga i okretni moment ovisi o specifičnom dizajnu i podešavanju vodikovog motora. [24]

Nedostatak vozila očituje se kroz nisku gustoću energije vodika u plinovitom stanju koja zahtijeva skladištenje pod visokim tlakom ograničavajući domet vožnje. Vodik se treba skladištiti u tekućem stanju pri iznimno niskim temperaturama od  $-253^{\circ}\text{C}$  što zahtijeva naprednu tehnologiju izolacije i pumpe za gorivo. [24]

Kada rade na vodik, motori s unutarnjim izgaranjem proizvode približno 15% manje snage u usporedbi s benzinom. Kako bi se ublažile emisije vodikovi motori obično su podešeni da rade na mršavoj smjesi, što dodatno smanjuje izlaznu snagu. To zahtijeva napredne sustave za obradu ispušnih plinova. Iako su vozila na vodikove gorive ćelije čišća od vozila na konvencionalna goriva, uz emitiranje vodene pare, emitira se i dušikov oksid koji onečišćuje zrak. [24]

Toyota 2022. godine testirala vozilo s izgaranjem vodika. Prema istraživanjima snaga izgaranja porasla je za 24%, a okretni moment za 33%. Domet vozila povećao se za 30%, a vrijeme punjenja gorivom skraćeno je s 5 minuta na 90 sekundi. Neke od država koje rade na projektima uvođenja takvih vozila su Japan, Njemačka, Ujedinjeno Kraljevstvo i Kina. Performanse vozila do kraja godine su se povećale, što prikazuje veliki potencijal vodika u osobnim vozilima. [32]

## 5. PRIMJERI PRIMJENE STRUJE I VODIKA U JAVNOM GRADSKOM PRIJEVOZU

Elektrifikacija javnog prijevoza je ključna za poboljšanje ekološkog aspekta urbanih sredina i poboljšanje kvaliteta života građana. Sve više gradova prepoznaje prednosti električnih vozila i ulaže u razvoj električne infrastrukture za javni prijevoz.

### 5.1. Primjena struje u javnom gradskom prijevozu

U električna vozila javnog gradskog prijevoza podrazumijevaju se električni autobusi, tramvaji, laka gradska željeznica te metro sustavi. Sva ta vozila koriste električnu energiju za pogon i postaju sve popularnija zbog njihove ekološke prihvatljivosti i efikasnosti. Prednosti su im zajedničke i podrazumijevaju nultu emisiju, tiši rad, efikasnost, te manje troškove održavanja. Nedostatci im se očituju kroz nerazvijenost infrastrukture, velike početne troškove, te kroz razinu dometa.

Postoje dvije vrste električnih autobusa, trolejbusi i autobusi na baterije. Tehnologija koju koriste trolejbusi podrazumijeva stupove na svojim krovovima za primanje struje preko žica iznad glave i na taj način održavaju rutu. Druga vrsta autobusa podrazumijeva autobuse koje pokreću baterije, najčešće litij-ionske.

Razlika između te dvije vrste je što trolejbusi zahtijevaju posebno izgrađenu infrastrukturu, dok električni autobusi imaju veću fleksibilnost i lakšu implementaciju u urbanim sredinama. Za razliku od trolejbusa električni autobusi nisu vezani za fizičku infrastrukturu poput nadzemnih žica, što im omogućava veću fleksibilnost u kretanju i ruti. Nedostatak se očituje kroz punjenje baterija, te ograničen domet zbog potreba za čestim punjenjem. Zbog ograničenog vijeka trajanja baterije dolazi do potrebe za zamjenom baterije, a troškovi zamjene baterija mogu biti vrlo visoki. Prednost električnih autobusa očituje se kroz fleksibilnost za različite rute.

Električni autobusi se sve više primjenjuju u Europskim gradovima s ciljem zagađenja okoliša i unaprijeđena održivosti javnog gradskog prijevoza. Neki od gradova gdje je takva tehnologija razvijena su Amsterdam, Berlin, Hamburg, Pariz, Prag i ostali. Amsterdam aktivno uvodi električne autobuse u svoj vozni park, dok je Berlin uveo značajan broj električnih autobusa kao dio svog voznog parka. Ostali gradovi također rade na proširenju svoje flote električnih autobusa, iz čega se može zaključiti da tehnologija kao takva ima puno potencijala. Sa sve većim napretkom u tehnologiji baterija i infrastrukturi za punjenje, očekuje se da će broj električnih autobusa u Europi nastaviti rasti.

Trolejbusi napajaju električnom energijom putem nadzemnih žica koje se protežu duž cijele rute. Među glavnim nedostacima je upravo njegova ograničena ruta zbog njegovih nadzemnih žica. Također nedostatci trolejbusa očituju se kroz velike troškove izgradnje infrastrukture zbog njegove potrebe za kontaktnom mrežom, dok je kod toga prednost što nema potrebe za punjenjem baterija zbog kontinuiranog napajanja iz kontaktne mreže, što

kod električnih autobusa pogonjenim baterijama nije slučaj iz razloga što su potrebne punionice za punjenje baterija.

Trolejbusi se primjenjuju u mnogim gradovima širom svijeta, posebno u urbanim sredinama gdje su stabilne, visokofrekventne rute pogodne za instalaciju i održavanje kontaktne mreže. Na slici 13 može se vidjeti trolejbus kojeg napaja kontaktna mreža, koja je smještena iznad njega.



*Slika 13. Trolejbus*

*Izvor: [12]*

Tramvaji su vrsta javnog prijevoza koja koristi tračnice postavljene na ulicama ili odvojenim trasama unutar urbanih sredina kako je prikazano na slici 9. Funkcioniraju na principu električnog pogona, koristeći elektromotore napajane iz nadzemnih žica ili treće tračnice. Oni su popularan oblik transporta zbog svoje efikasnosti, ekološke prihvatljivosti i kapaciteta za prijevoz velikog broja putnika. Napajaju se putem nadzemnih žica, slično kao i trolejbusa ili ponekad putem treće tračnice ili induktivnog napajanja. Tračnice po kojima se kreću tramvaji su položene na ulicama ili su posebno zagrađene u posebnim trakama. Mogu biti integrirane sa drugim oblicima transporta poput cestovnog.

Električna energija se koristi za pogon elektromotora koji pokreće tramvajske kotače. Kod ove tehnologije transporta elektromotori su visoko efikasni i omogućavaju brzo ubrzanje i kočenje. Mnogi moderni tramvaji koriste regenerativno kočenje kod kojeg se energija kočenja vraća u električni sistem, te na taj način smanjuje potrošnju energije. Prednosti tramvaja očituju se kroz veliki kapacitet prijevoza putnika u usporedbi s autobusima, što ih čini

efikasnim za veće urbane sredine. Također to je jedan od oblika prijevoza koji je brz i pouzdan, posebno u gradovima gdje su tramvajske trase odvojene od ostalih oblika transporta, jer se na taj način izbjegavaju zastoji u prometu. Na slici 14 prikazan je tramvajski sustav Grada Zagreba.



Slika 14. Tramvaj

Izvor: [13]

## 5.2. Primjena vodika u javnom gradskom prijevozu

Vodik se u javnom gradskom prijevozu primjenjuje u autobusima na gorive ćelije (*Fuel Cell Electric Buses - FCEB*). Oni koriste vodik za proizvodnju električne energije koja pokreće elektromotore. U takvoj tehnologiji gorive ćelije osiguravaju energiju vozila za rad, dok baterija pružaju snagu motorima kako bi savladali uspone i nagla ubrzanja. Korištenjem gorive ćelije u kombinaciji s baterijom, veličina svake može se optimizirati za određenu rutu.

Primjena vodika u javnom gradskom prijevozu ima potencijal da značajno smanji emisije štetnih plinova i poboljša kvalitetu zraka, doprinoseći time održivijim urbanim sredinama. Sa daljnjim razvojem tehnologije i infrastrukture, očekuje se sve veća upotreba vodika u ovom pogledu.

U prednost autobusa na vodikove gorive ćelije ubraja se njihova visoka energetska učinkovitost. Učinkovitost pretvorbe energije vodikovih gorivih ćelija veća je od one kod tradicionalnog motora s unutarnjim izgaranjem, što znači da autobusi s vodikovim gorivim ćelijama zahtijevaju manje goriva za prelazak iste udaljenosti, a samim time povećava se ušteda goriva. Niska razina buke čini ih optimalnim za upotrebu u urbanim sredinama. [30]

Autobusi na vodikove gorive ćelije mogu prijeći preko 500 kilometara na jednom spremniku vodika, što ovisi o veličini spremnika i energetskej učinkovitosti autobusa. Točan domet autobusa na vodikove gorive ćelije ovisi o nizu čimbenika, uključujući veličinu i kapacitet spremnika vodika, učinkovitost sustava gorivih ćelija i uvjete vožnje kao što su brzina, teren i vrijeme. Punjenje spremnika traje otprilike 7 minuta, što je velika prednost u odnosu na autobuse na konvencionalna goriva i električne autobuse. [30]

Iako je vodik zapaljivi plin spremnici vodika na autobusima s vodikovim gorivim ćelijama su dizajnirani i izrađeni prema strogim sigurnosnim standardima kako bi se spriječilo curenje ili mogućnost nastanka nesreće, što ih čini sigurnim i pouzdanim. [30]

Na slici broj 15 može se vidjeti kako su spremnici vodika obično pohranjeni na krovu autobusa, dok su gorive ćelije i električni motor smješteni u stražnjem dijelu autobusa.



Slika 15. Elementi autobusa na gorive ćelije

Izvor: [7]

Električna energija koristi se za izravnu električnu vuču i održavanje napunjenosti baterija. Toplina nusproizvoda pohranjuje se na kočionim otpornicima i koristi se za održavanje udobnosti grijanja putnika i značajno povećanje energetske učinkovitosti. Svu energiju potrebnu za rad autobusa osigurava vodik pohranjen u njemu. [11]

U Europi je 2023. godine prometovalo ukupno 370 autobusa na gorive ćelije, no planovi su podići taj broj na 1200 do 2025. godine. Te godine bilo je registrirano više od 200 autobusa u Europi, što je predstavljalo povećanje za čak 109% u odnosu na godinu 2022. [11]

Godine 2024. uvedeno je 131 autobusa u Njemačkoj, Italiji, Nizozemskoj i Velikoj Britaniji što predstavlja značajan napredak prema održivom gradskom prijevozu. [11]

Na slici 16 prikazani su gradovi u Europi u kojima se primjenjuju autobusi na pogon vodikovim gorivim člancima.



U radu



Planirani

Slika 16. Autobusi na pogon vodikovim gorivim člancima u Europi

Izvor: [9]



## 6. PRIMJERI PRIMJENE STRUJE I VODIKA U POMORSKOM PROMETU

Primjena električne energije kao pogonskog goriva na brodovima predstavlja značajan korak u pomorskoj industriji, s ciljem smanjenja negativnih utjecaja na okoliš i poboljšanja energetske učinkovitosti. Tradicionalni brodski pogonski sustavi se oslanjaju na fosilna goriva poput dizela, a samim time doprinose značajnim emisijama štetnih plinova, uključujući ugljični dioksid, sumporov dioksid i dušikove okside. Te emisije zagađuju zrak i morski okoliš i doprinose globalnom zagrijavanju i klimatskim promjenama.

### 6.1. Primjena struje u pomorskom prometu

Električni pogon ima nekoliko prednosti u odnosu na konvencionalne sustave. Neke od prednosti su smanjenje ili eliminacija emisija stakleničkih plinova, ovisno o izvoru električne energije. U slučaju proizvodnje električne energije putem obnovljivih izvora poput vjetra, sunca ili hidroelektrana, ukupni ekološki utisak brodova može se znatno smanjiti. Također električni pogon često omogućava tiši rad brodova, smanjujući buku koja može negativno utjecati na morski život, posebno morske sisavce. Električni sustavi mogu pružiti veću učinkovitost i pouzdanost, smanjujući troškove održavanja i operativne troškove na duže vrijeme.

Princip rada električnog broda temelji se na korištenju električne energije za pogon elektromotora koji pokreću brodske propelere ili druge pogonske mehanizme. Implementacija električnih pogonskih sustava na brodovima uključuje niz tehnologija, uključujući baterijske sustave, gorive ćelije i hibridne sustave koji kombiniraju električne i konvencionalne pogone. Ove tehnologije još su u fazi razvoja i prilagodbe, ali pokazuju veliki potencijal za transformaciju pomorskog sektora. Brodovi s električnim pogonom već su u upotrebi u nekim segmentima, poput trajekata i malih putničkih brodova, a očekuje se da će se njihov broj i raspon primjene povećavati kako tehnologija bude napredovala i postajala ekonomski isplativija. [4]

Baterije su glavni izvor energije za električne brodove. Najčešće korištene baterije su litij-ionske baterije, kao i kod električnih automobila zbog njihove visoke energetske gustoće, dugog vijeka trajanja i relativno brze mogućnosti punjenja. One se pune na obali putem priključka za punjenje. Neki od brodova mogu koristiti i regenerativno kočenje za djelomično punjenje baterija tijekom usporavanja ili zaustavljanja. [4]

Kod hibridnog sustava koji podrazumijeva kombinaciju dizelskog goriva s električnim pogonom, kombinira se dizelski motor s generatorom koji proizvodi električnu energiju za napajanje elektromotora. Takav hibridni sustav omogućuje veću fleksibilnost i može smanjiti potrošnju goriva. Koristi se u velikim komercijalnim brodovima kao što su teretni brodovi, kruzeri i trajekti zbog njihove pouzdanosti i fleksibilnosti.

Hibridni sustav s gorivim ćelijama podrazumijeva korištenje vodika kao gorivo u kombinaciji s kisikom iz zraka, proizvodeći na taj način električnu energiju, vodu i toplinu. Takav sustav posebno je koristan u regijama s razvijenom infrastrukturom za vodik ili u regijama u kojima postoji visoki prioritet za smanjenje emisija.

Bitna razlika između tih sustava je tehnička složenost, te operativna fleksibilnost. Hibridni sustav s gorivim ćelijama je složeniji sustav koji zahtijeva naprednu tehnologiju i specijaliziranu infrastrukturu u odnosu na sustav koji kombinira dizel i električnu energiju zbog njegove poznate i široke primjene.

Problemi kod takvih sustava odnose se na ograničen domet zbog trenutnog kapaciteta baterija, visoke početne investicije i potrebu za razvojem infrastrukture za punjenje. S obzirom na rastući pritisak za smanjenje emisija i zaštitu okoliša, kao i napredak tehnologije, električni pogon na brodovima predstavlja ključnu komponentu budućnosti održivog pomorskog transporta.

Električni brodovi se sve više koriste u različitim sektorima pomorskog transporta širom svijeta. Primjer primjene električnih putničkih brodova je u Amsterdamu gdje se koriste u urbanim sredinama za prijevoz putnika duž rijeka i kanala. Električni teretni brodovi postaju sve popularniji, posebno za plovidbu na unutrašnjim plovnim putovima. Njih primjenjuje Nizozemska zbog svojeg razvijenijeg sustava rijeka i kanal. [4]

## **6.2. Primjena vodika u pomorskom prometu**

Kada je u pitanju vodik u pomorskom prometu, koristi se na nekoliko inovativnih načina. Najčešće se koristi u kombinaciji s motorima s unutarnjim izgaranjem koji su posebno dizajnirani i modificirani za korištenje vodika, što omogućuje korištenje postojećih tehnologija uz manje modifikacije. Vodik ima potencijal da revolucionira pomorski promet pružajući čistu i održivu alternativu tradicionalnim fosilnim gorivima.

Brodovi na vodik koriste gorive ćelije za pogon, čime se smanjuje zagađenje pomorskog transporta. Gorive ćelije koriste vodik za proizvodnju električne energije, koja se zatim koristi za pogon elektromotora broda. Ova tehnologija je posebno pogodna za trajekte, manja plovila i plovila za kratke udaljenosti, slično kao i kod osobnih automobila.

Kada su u pitanju hibridni sistemi kombinacija gorivih ćelija i baterija može se koristiti za povećanje efikasnosti i pružanje rezervne energije. Gorive ćelije mogu raditi kontinuirano, dok baterije mogu pružiti dodatnu snagu kada je to potrebno.

Nedostatci korištenja vodika u pomorskom prometu očituju se kroz nerazvijenost infrastrukture, visokim troškovima proizvodnje i skladištenja vodika, te tehničke izazove poput tehnologije za sigurno skladištenje i transport vodika.

Razvija se infrastruktura za punjenje vodika u lukama, što uključuje stanice za punjenje tečnim ili komprimiranim vodikom. Lučke pumpe nalaze se u lukama kako bi se podržala infrastruktura za brodove na vodik. Takve stanice omogućavaju brzo i efikasno punjenje

brodova, podržavajući operativne potrebe pomorskog transporta. Mnoge od takvih stanica planiraju koristiti obnovljive izvore energije za proizvodnju vodika putem elektrolize, čime se dodatno smanjuje ekološki otisak. [4]

Također neki od brodova opremljeni su elektrolizatorom, koji ima mogućnost korištenja morske vode za proizvodnju vodika putem elektrolize koristeći električnu energiju iz obnovljivih izvora poput solarnih panela ili vjetroturbina instaliranih na brodu. Takav pristup omogućava brodovima da budu samoodrživi u proizvodnji goriva, smanjujući potrebu za čestim zaustavljanjima radi punjenja. [4]

Razlike u konstrukciji brodova koji koriste benzin i vodik kao gorivo su velike, obuhvaćaju različite aspekte dizajna, materijala, sigurnosnih sistema i infrastrukture za gorivo. Konstrukciju broda koji koristi tekući vodik kao alternativno gorivo razlikuje kod konstrukcije broda koja koriste konvencionalna goriva kako je prikazano na slici 17. Rezervoari su veći i vidljiviji zbog potrebe za skladištenje vodika pod visokim pritiskom ili u tekućem stanju, što povećava ukupne dimenzije broda. Zbog sigurnosnih razloga i potrebe za dodatnim izolacijskim materijalima takvi brodovi mogu imati dodatne ili veće strukture na palubi. Brodovi na vodik često imaju dodatne oznake upozorenja, te specijalizirane sisteme za skladištenje goriva koji utiču na njihov vanjski izgled.



*Slika 17. Konstrukcija broda na tekući vodik*

*Izvor: [8]*

## 7. KOMPARATIVNA ANALIZA VODIKA I STRUJE KAO POGONSKOG GORIVA

Potreba za održivim i ekološki prihvatljivim oblicima energije postala je ključni izazov kada je riječ o transportu. Struja i vodik se izdvajaju kao dva glavna izvora za budućnost pogonskih goriva. Električna vozila i vozila na vodik predstavljaju dvije različite tehnologije s potencijalom da preoblikuju transportni sektor, svaka sa svojim specifičnim prednostima i izazovima.

Vodik u vozilu omogućuje veći domet, bez čestog punjenja. Domet vožnje za električna vozila može se kretati do 500 kilometara, dok se za automobile na vodik kreće do preko 600 kilometara. [17] Veličina spremnika za vodik također utječe na veličinu dometa.

Kod vodikovih vozila energija se pretvara iz kemijske energije u električnu energiju, što dovodi do veće neučinkovitosti. Zbog složenih procesa koji su uključeni u proizvodnju i skladištenje vodika i pretvaranje vodika u električnu energiju u gorivim ćelijama, električna vozila na gorive ćelije su općenito samo oko 38% učinkovita, dok su električni automobili energetski učinkoviti, zbog toga što koriste oko 80% ukupne energije za pogon vozila. [17]

Kada je riječ o utjecaju na okoliš, vodikova vozila su optimalnija od vozila na baterije. Vodik i električna energija u vozilu proizvode nultu emisiju štetnih plinova, ali izrada baterija za električna vozila ima negativan utjecaj na okoliš. Odlaganje baterija može dovesti to onečišćenja okoliša i iscrpljivanja resursa.

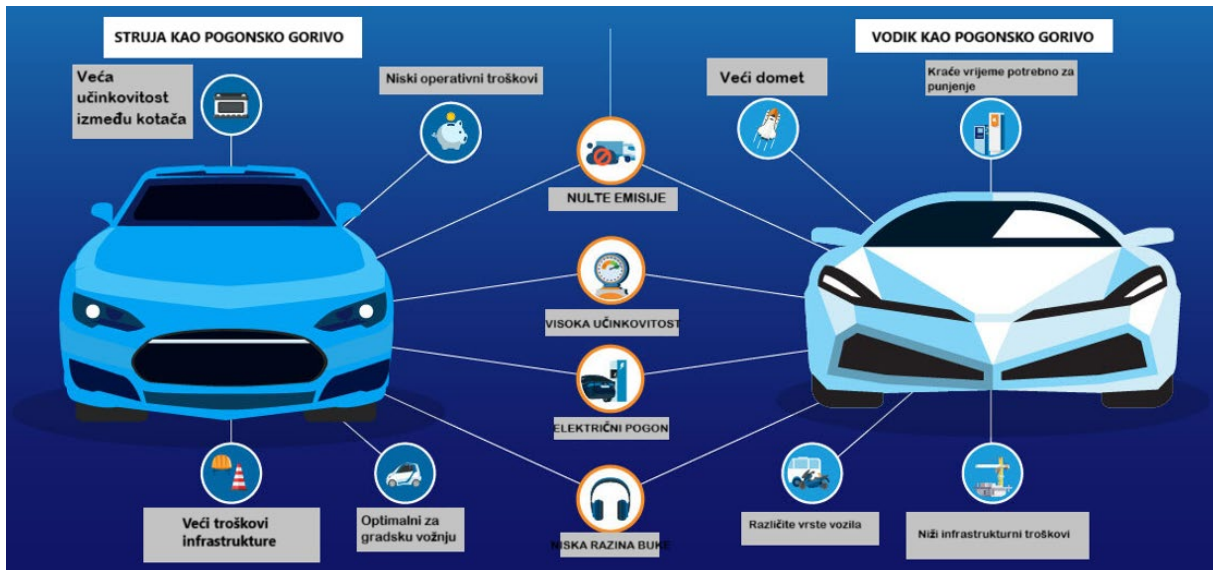
Prednost kod vodika kao pogona je što se može koristiti kod svih tipova vozila s motorom s unutarnjih izgaranjem, što smanjuje troškove kod proizvodnje takvih vozila i omogućuje ugradnju u postojeće sustave.

Električna vozila su pogodna za vožnju u urbanim sredinama zbog svoje male razine buke, nulte emisije štetnih plinova, i nižih operativnih troškova. Neki gradovi imaju dobro razvijenu infrastrukturu za punjenje, a kratke udaljenosti u gradu smanjuju zabrinutost oko potrebe za punjenjem.

Razlika u infrastrukturi kod struje kao pogonskog vozila i vodika kao pogonskog vozila je u razvijenijoj infrastrukturi kod električnih vozila i mogućnosti punjenja u urbanim sredinama, te mogućnosti punjenja kod kuće.

Infrastruktura za punjenje vodika je manje razvijena i dostupna je u ograničenim područjima zbog postavljanja vodikovih stanica koje je složenije i skuplje, no prednost je mogućnost korištenja već postojeće infrastrukture konvencionalnih goriva. Punjenje vodikom traje samo nekoliko minuta kao i kod konvencionalnih goriva, dok punjenje strujom traje do nekoliko sati što je nedostatak kod električnih vozila. [18]

Na slici 18 prikazane su glavne razlike između struje i vodika kao pogonskog goriva. Električna vozila imaju niže operative troškove zbog efikasnosti, niže cijene struje naspram vodika, jednostavnosti održavanja zbog manje okretnih dijelova i slično.



Slika 18. Razlike između struje i vodika kao pogonskog goriva

Izvor: [18]

## 8. ZAKLJUČAK

Električna energija i vodik predstavljaju dvije ključne alternative fosilnim gorivima u transportu, svaka od tih tehnologija dolazi s vlastitim prednostima, ali i značajnim izazovima. Električna energija, posebice u kontekstu električnih vozila, stječe sve veću popularnost i široku primjenu zahvaljujući brzim tehnološkim inovacijama u razvoju baterija, smanjenju troškova proizvodnje te rastućoj infrastrukturi za punjenje. Električna vozila, osim što nude visoku energetska učinkovitost, također značajno doprinose smanjenju emisija štetnih plinova, što ih čini vrlo ekološki prihvatljivom opcijom za osobni i javni prijevoz. Napredak u razvoju baterija s većim kapacitetom, kraćim vremenom punjenja i duljim vijekom trajanja omogućuje električnim vozilima da sve više zadovolje potrebe šire populacije, dok stalna ulaganja u infrastrukturu za punjenje doprinose sve većoj pristupačnosti i praktičnosti tih vozila.

Međutim, iako su električna vozila izuzetno prikladna za osobni prijevoz u urbanim sredinama i na kraćim relacijama, njihova efikasnost opada kada je riječ o teškom teretnom prometu ili putovanjima na velike udaljenosti, gdje ograničen domet i duže vrijeme punjenja još uvijek predstavljaju izazov. Upravo tu dolazi do izražaja vodik kao gorivo budućnosti, posebice u segmentima transporta koji zahtijevaju veći domet, kraće vrijeme stajanja i veći kapacitet goriva. Vodikova visoka energetska gustoća, u kombinaciji s bržim procesom punjenja u usporedbi s baterijama, čini ga idealnim za upotrebu u sektorima poput teškog teretnog prijevoza, pomorskog prometa, pa čak i zrakoplovstva.

Ipak, unatoč brojnim prednostima, vodik se suočava s nizom izazova koji trenutno ograničavaju njegovu širu primjenu. Prije svega, proizvodnja vodika, posebice "zelenog vodika" putem elektrolize korištenjem obnovljivih izvora energije, još uvijek je relativno skupa u usporedbi s fosilnim gorivima. Dodatno, procesi proizvodnje, kompresije, transporta i skladištenja vodika uključuju značajne energetske gubitke, što smanjuje ukupnu efikasnost vodikovih sustava. Također, infrastruktura za distribuciju i punjenje vodika je vrlo ograničena, što predstavlja ključni izazov za njegovu široku komercijalizaciju. Sigurnosni aspekti povezani s pohranom i transportom vodika zbog njegove zapaljivosti također zahtijevaju dodatna istraživanja i razvoj novih tehnologija kako bi se osigurala sigurnost i učinkovitost u njegovom korištenju.

Usprkos tim izazovima, vodik se sve više prepoznaje kao ključni element u tranziciji prema održivom energetska sustavu. Njegova svestranost i sposobnost korištenja u različitim sektorima, uključujući industriju, zrakoplovstvo, teški transport i čak stacionarne energetska sustave, pružaju mnoge mogućnosti za smanjenje emisija stakleničkih plinova i

povećanje energetske sigurnosti. Upotreba vodika može značajno smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima i geopolitičke rizike povezane s opskrbom naftom i prirodnim plinom, čime doprinosi stabilnosti globalnih energetske sustava.

Razvoj infrastrukturnih projekata za proizvodnju, skladištenje, transport i distribuciju vodika zahtijeva značajna ulaganja, no uz odgovarajuću političku i financijsku podršku, ti izazovi mogu biti prevladani. Uspjeh vodika kao alternativnog goriva ovisit će o daljnjem smanjenju troškova proizvodnje, posebno iz obnovljivih izvora energije, kao i o povećanju efikasnosti cijelog lanca vrijednosti vodika, od proizvodnje do krajnje upotrebe. Važno je napomenuti da se inovacije u proizvodnji vodika, poput korištenja otpadnih materijala ili bioloških procesa, već istražuju i imaju potencijal za daljnje smanjenje troškova i povećanje održivosti.

S obzirom na sve navedeno, budućnost održivog prometa vjerojatno će uključivati sinergiju između električne energije i vodika, s time da će se električna energija vjerojatno koristiti u osobnom prijevozu i urbanim sredinama, dok će vodik igrati ključnu ulogu u težim i dugotrajnim oblicima transporta. Električni automobili već su dokazali svoju vrijednost kao održiva opcija, dok vodik još uvijek ima prostora za razvoj i komercijalizaciju. U konačnici, tranzicija prema održivijem prometnom sustavu zahtijeva ne samo tehnološki napredak, već i integriranu podršku od strane vlada, industrije i potrošača kako bi se stvorili uvjeti za široku primjenu ovih tehnologija. Samo kombinacijom tih napora električna energija i vodik moći će osigurati dugoročno smanjenje emisija stakleničkih plinova, poboljšanje kvalitete zraka i smanjenje utjecaja klimatskih promjena na globalnoj razini.

## LITERATURA

- [1] Moloughney T. „We Talk Tesla Connectors And Future Network Plans With EV Charging Network, Evgo“, *INSIDEEVs*, ožujak 2021. Preuzeto s: <https://insideevs.com/news/491187/evgo-interview-tesla-connectors-future-plans/> (Pristupljeno: 07. srpnja 2024.)
- [2] Verčević I. *Ukapljeni prirodni plin i vodik kao alternativna goriva u transportu*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet; 2024. Preuzeto s: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/rgn%3A2149/datastream/PDF/view> (Pristupljeno: 07. srpnja 2024.)
- [3] Wrobel K., Wrobel J., Tokarz W., Lack J., Podsadni K., Czerwinski A., „Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A review.“ *MDPI*, vol. 15, studeni 2022. Preuzeto s: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8937> (Pristupljeno: 18. srpnja 2024.)
- [4] Laursen, R.; Patel, H.; Dowling, M.; Sofiadi, D.; Ji, C.; Nelissen, D.; Király, J.; van der Veen, R.; Pang, E., „Potential of hydrogen as fuel for shipping“, EMSA, Lisboa, Portugal, 4837444, 136-151, studeni 2023. Preuzeto s: <https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/5062-potential-of-hydrogen-as-fuel-for-shipping.html> (Pristupljeno: 19. srpnja 2024.)
- [5] Olajoš A. *Gorivi članci*. Završni rad. Sveučilište u Rijeci; 2018. Preuzeto s: <https://repository.ricent.uniri.hr/islandora/object/ricent%3A15/datastream/PDF/view> (Pristupljeno: 19. srpnja 2024.)
- [6] Blažević V. Rad na električnim vozilima. Završni rad. Veleučilište u Karlovcu; 2021. Preuzeto s: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka:2105/datastream/PDF/view> (Pristupljeno: 19. srpnja 2024.)
- [7] Fuel Cell Electric Buses. *About fuel cell electric buses* [Online]. Preuzeto s: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/fuel-cell-electric-buses-fuel-cell-electric-buses/about-fuel-cell-electric-buses> (Pristupljeno: 19. srpnja 2024.)
- [8] Holtze B., „World’s first liquid-powered hydrogen ship, MF Hydra, is powered by Ballard’s fuel cells“, *BALLARD*, listopad 2023. Preuzeto s: <https://blog.ballard.com/marine/worlds-first-liquid-powered-hydrogen-ship-mf-hydra-is-powered-by-ballards-fuel-cells> (Pristupljeno: 19. srpnja 2024.)
- [9] Mikulić I. *Uloga vodika u smanjenju emisija CO2 u javnom gradskom prijevozu*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2024. Preuzeto s: <https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A6221/datastream/PDF/view> (Pristupljeno: 25. srpnja 2024.)
- [10] Ivona, „Pregled najnovijih podataka o električnim vozilima u Europi“, *E-Mobility Europe*, ožujak 2024. Preuzeto s: <https://epunjaci.hr/2024/03/13/e-mobility-europe-pregled-najnovijih-podataka-o-elektricnim-vozilima-u-europi/> (Pristupljeno 25. srpnja 2024.)
- [11] Staff E., „Fuel cell bus projects in the spotlight: fleets, manufacturers, trends“, *Sustainable Bus*, srpanj 2024. Preuzeto s: <https://www.sustainable-bus.com/fuel-cell-bus/fuel-cell-bus-hydrogen/> (Pristupljeno: 26. srpnja 2024.)
- [12] Sasa, „Solaris isporučuje 24 trolejbusa za Budimpeštu“, *AUTOBUSI.NET*, prosinac 2014. Preuzeto s: <https://www.autobusi.net/solaris-isporucuje-24-trolejbusa-za-budimpestu/> (Pristupljeno: 26. srpnja 2024.)



- [13] Šurina M., „Radovi u centru Zagreba: Tramvaji mijenjaju trase, evo kako voze“, *Tportal*, kolovoz 2024. Preuzeto s: <https://www.tportal.hr/vijesti/clanak/radovi-u-centru-zagreba-tramvaji-mijenjaju-trase-evo-kako-voze-foto-20240820> (Pristupljeno: 26. srpnja 2024.)
- [14] Europski revizorski sud. „Infrastruktura za punjenje električnih vozila: dostupan je veći broj punionica, ali putovanje EU-om otežano je neujednačenim uvođenjem infrastrukture“, Zagreb, Hrvatska, 29. – 34., 2021. Preuzeto s: <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/electrical-recharging-5-2021/hr/> (Pristupljeno: 21. kolovoza 2024.)
- [15] Gerhold D. „Hydrogen Powered Vehicles How They Work“, *Schematic and Diagram Full List*, listopad 2023. Preuzeto s: Hydrogen Powered Vehicles How They Work (windows.net) (Pristupljeno: 31. kolovoza 2024.)
- [16] European Commission, (2020, tra. 29), *Hydrogen & Fuel Cells* [Online]. Preuzeto s: [https://www.change-climate.com/Transport\\_Land\\_Sea\\_Sustainable/SMART\\_Hybrid\\_EV\\_Energy\\_Service\\_Networks/FASTC\\_HARGE\\_Hydrogen\\_Safety\\_Fuel\\_Cell\\_Cartridges\\_Electric\\_Vehicle\\_Infrastructure.htm](https://www.change-climate.com/Transport_Land_Sea_Sustainable/SMART_Hybrid_EV_Energy_Service_Networks/FASTC_HARGE_Hydrogen_Safety_Fuel_Cell_Cartridges_Electric_Vehicle_Infrastructure.htm) (Pristupljeno: 31. kolovoza 2024.)
- [17] Voelcker J., „Hydrogen Fuel-Cells Vehicles: Everything You Need To Know“, *CAR AND DRIVER*, travanj 2024. Preuzeto s: Hydrogen Cars: Everything You Need To Know (caranddriver.com) (Pristupljeno: 31. kolovoza 2024.)
- [18] LePan N., „6 Ways Hydrogen and Fuel Cells Can Help Transition to Clean Energy“, *VISUAL CAPITALIST*, svibanj 2020. Preuzeto s: How Hydrogen and Fuel Cells Can Help Drive the Clean Energy Transition (visualcapitalist.com) (Pristupljeno: 31. kolovoza 2024.)
- [19] Voelcker J., „Electric-Vehicle Battery Basics“, *CAR AND DRIVER*, srpanj 2024. Preuzeto s: Electric-Car Battery Guide (caranddriver.com) (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [20] CHARGELAB. (2024, travanj 16). *The truth about EV battery recycling* [Online]. Preuzeto s: The truth about EV battery recycling (chargelab.co) (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [21] Coronelli E. *Recikliranje baterija iz električnih automobila*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet; 2020. Preuzeto s: view (unizg.hr) (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [22] SNAM. (2024). *Recikliranje* [Online]. Preuzeto s: RECIKLIRANJE – SNAM recikliranje baterija – Recikliranje baterija (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [23] Epunjaci.hr. (2023, ožujak 15). *5 zanimljivosti koje možda niste znali o EV baterijama* [Online]. Preuzeto s: 5 zanimljivosti koje možda niste znali o EV baterijama - E-Punjači (epunjaci.hr) (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [24] Pande N., „The Future of Hydrogen IC Engines (HICEVs): A Paradigm Shift in Sustainable Mobility“, *GHW*, 2023. Preuzeto s: The Future of Hydrogen IC Engines (HICEVs): A Paradigm Shift in Sustainable Mobility (greenh2world.com) (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [25] Tkalec M., „Electric vehicle (EV) charging stations in Croatia“, *EXPAT IN CROATIA*, svibanj 2023. Preuzeto s: Electric vehicle (EV) charging stations in Croatia - Expat In Croatia (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)

- [26] Conte N., „EV Charging Stations Across the U.S. Mapped“, *ELEMENTS*, listopad 2022. Preuzeto s: Interactive: EV Charging Stations Across the U.S. Mapped (visualcapitalist.com) (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [27] GLOBAL MBLTY CALL. (2024, studeni 21). *Reviewing the charger network in Europe: progress and challenges in the transition to sustainable mobility* [Online]. Preuzeto s: Charger network in Europe: progress and challenges of sustainable mobility (ifema.es) (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [28] Energy and transportation. (2024). *Electric Vehicle Charging Stations* [Online]. Preuzeto s: Electric Vehicle Charging Stations · Joint Office of Energy and Transportation (driveelectric.gov) (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [29] ACEA. (2023, veljača 23). *Interactive map – Correlation between electric car sales and charging point availability (2022 data)* [Online]. Preuzeto s: Interactive map – Correlation between electric car sales and charging point availability (2022 data) - ACEA - European Automobile Manufacturers' Association (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [30] Karsan. (2023, veljača 23). *HOW DOES A HYDROGEN FUEL CELL BUS WORK?* [Online].  
Preuzeto s: What is Hydrogen Fuel Cell Bus? | Karsan (Pristupljeno: 06. rujna 2024.)
- [31] HAK. (2024). Benzinske postaje na području Republike Hrvatske. Preuzeto s: HAKmap. (Pristupljeno : 07. rujna 2021.)
- [32] TOYOTA. (2022, prosinac 5). Prototype Corolla Cross Hydrogen Concept. Preuzeto s: Toyota develops a prototype hydrogen combustion road car (toyota-europe.com) (Pristupljeno : 08. rujna 2021.)
- [33] Holding J. „What is a plug-in hybrid car? What does PHEV mean?“, *Top Gear*, (2023, travanj 12). Preuzeto s: What is a plug-in hybrid car? What does PHEV mean? | Top Gear (Pristupljeno : 08. rujna 2021.)
- [34] Ritchie H., „Tracking global data on electric vehicle“, *Our World in Data*, (veljača 2024). Preuzeto s: Tracking global data on electric vehicles - Our World in Data (Pristupljeno : 08. rujna 2021.)

## POPIS KRATICA

AC	(Alternating current) izmjenična struja
DC	(Direct current) istosmjerna struja
SNAM	( <i>Société Nouvelle d’Affinage des Métaux - SNAM</i> ).
PEM	(Proton exchange membrane fuel cell) gorivi članak s polimernom membranom
FCEV	(Fuel Cell Electric Vehicles) električna vozila na gorive ćelije
HICEV	(Hydrogen internal combustion engine vehicle) vozilo s motorom s unutarnjim izgaranjem na vodik
BEV	(Battery electric vehicle) električno vozilo na baterije
PHEV	(Plug-in hybrid electric vehicles) plug-in hibridna električna vozila
HEV	(Hybrid Electric Vehicles) hibridna električna vozila
ICE	(Internal combustion engine vehicle) vozilo s motorom s unutarnjim izgaranjem
FCEB	(Fuel Cell Electric Buses) električni autobusi na gorive ćelije

## POPIS SLIKA, TABLICA I GRAFIKONA

Slika 1. Punionica električnih automobila .....	5
Slika 2. Stanice za punjenje električnih vozila u Sjedinjenim Američkim Državama.....	6
Slika 3. Broj punionica u Europi.....	7
Slika 4. Broj punionica za punjenje električnih vozila na području Republike Hrvatske.....	9
Slika 5. Benzinske postaje u Republici Hrvatskoj .....	9
Slika 6. Broj i omjer javnih punionica na 100 km <sup>2</sup> kopnene površine.....	10
Slika 7. PEM gorivi članak .....	13
Slika 8. Princip rada vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem na vodik .....	15
Slika 9. Princip rada električnog vozila .....	18
Slika 10. Princip rada hibridnog električnog vozila .....	19
Slika 11. Prodaja Plug-in hibridnih vozila od 2010. do 2023.....	20
Slika 12. Princip rada električnih vozila na gorive ćelije.....	21
Slika 13. Trolejbus.....	24
Slika 14. Tramvaj.....	25
Slika 15. Elementi autobusa na gorive ćelije .....	26
Slika 16. Autobusi na pogon vodikovim gorivim člancima u Europi .....	27
Slika 17. Konstrukcija broda na tekući vodik.....	30
Slika 18. Razlike između struje i vodika kao pogonskog goriva .....	32
Tablica 1. Dostupne tehnologije za punjenje u Europi .....	4
Grafikon 1. Prodaja automobila u Europi 2023.....	2

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je Završni rad isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Analiza struje i vodika kao pogonskog goriva prema vrsti prijevoza , u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 12.09.2024

Stjepan Pucević

