Uloga vodika u smanjenju emisija CO2 u javnom gradskom prijevozu

Mikulić, Ivana

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:785204

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivana Mikulić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica: Studentica:

Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE. Ivana Mikulić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovom prilikom željela bih se zahvaliti svima koji su me podržavali u pisanju ovog završnog zadatka, ponajviše doc. dr. sc. Ankici Kovač na mentorstvu, susretljivosti, strpljenju i pomoći oko svih problema koji su se javljali prilikom pisanja. Zahvaljujem se svojoj obitelji na pomoći i potpori što mi je bezuvjetno pružaju tijekom cijelog školovanja što me potiče na daljnji trud i rad.

Također, zahvaljujem se svim svojim prijateljima što su uz mene tijekom svih ovih godina na preddiplomskom studiju te su time omogućili da mi ono ostane u lijepom i ugodnom sjećanju.

Ivana Mikulić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivana Mikulić** Mat. br.: 0035208984

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Uloga vodika u smanjenju emisija CO_2 u javnom gradskom prijevozu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The role of hydrogen in reducing CO_2 emissions in public transport**

Opis zadatka:

Autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima zbog svojih su značajki atraktivno rješenje za javni gradski prijevoz jer su vrlo tihi i učinkoviti bez popratnih emisija CO_2. Korištenjem vodika proizvedenog samo iz obnovljivih izvora energije, jedan standardni autobus na pogon vodikovim gorivnim člancima uštedio bi oko 800 tona CO_2 u 12 godina u usporedbi s konvencionalnim dizelskim autobusima. U ovom radu istražit će se utjecaj na smanjenje CO_2 u gradu Zagrebu parcijalnim uvođenjem autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima u javni prijevoz.

U radu je potrebno:

1. Istražiti trenutno stanje javnog gradskog prijevoza temeljenog na vodiku u EU.
2. Provesti analizu emisija CO_2 u gradu Zagrebu s naglaskom na javni gradski prijevoz.
3. Predložiti scenarije parcijalnog uvođenja autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima na ulice grada Zagreba uključujući i okvirnu analizu troškova.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
15. svibnja 2020.	**2. rok (izvanredni):** 1. srpnja 2020. **3. rok:** 17. rujna 2020.	**2. rok (izvanredni):** 3.7.2020. **3. rok:** 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE. Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA IV

SAŽETAK VI

SUMMARY VII

1. UVOD 1

2. VODIK I GORIVNI ČLANCI 3

2.1 Osnovne značajke vodika 3

2.2 Proizvodnja vodika 4

2.3 Korištenje vodika – gorivni članci 5

3. AUTOBUSI NA POGON VODIKOVIM GORIVNIM ČLANCIMA 6

3.1 Osnovne značajke autobusa na pogon vodikom 8

4. JAVNI GRADSKI PRIJEVOZ TEMELJEN NA VODIKU U EUROPSKOJ UNIJI 9

4.1 Italija 10

4.2 Njemačka 11

4.3 Nizozemska 11

4.4 Francuska 12

4.5 Belgija 13

4.6 Danska 13

4.7 Austrija 14

4.8 Ostale države članice Europske Unije 14

4.9 Ujedinjeno Kraljevstvo, Norveška i Švicarska 14

5. ZAGREB I CO_2 16

6. JAVNI GRADSKI PRIJEVOZ U ZAGREBU 17

7. GRADSKI AUTOBUSI U ZAGREBU – EMISIJA CO_2 20

7.1 Emisija CO_2 u 2019. Godini 21

7.2 Značenje emisije CO_2 ZET autobusa 21

7.3 Punionice vodika u Gradu Zagrebu 23

7.4 Trenutna zamjena 10% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima 24

7.4.1 Analiza troškova trenutne zamjene 10% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima 25

7.5 Potpuna zamjena svih ostalih autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima 26

7.5.1 Zamjena 35% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima + potpuna instalacija punionica vodika do 2025. godine 26

7.5.2. Analiza troškova zamjene 35% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima + potpune instalacija punionica vodika do 2025. godine 27

7.5.3 Zamjena ostatka autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima 28

7.5.4 Analiza troškova zamjene ostatka autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima 28

7.6 Učinak na okoliš i ukupni troškovi u razdoblju 2020.-2030. 29

7.7 Zamjena autobusa pogonjenih stlačenim prirodnim plinom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima u razdoblju od 2030.-2034. Godine 30

7.7.1 Analiza troškova zamjene autobusa pogonjenih stlačenim prirodnim plinom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima u razdoblju od 2030.-2034. Godine 31

7.8 Ukupan utjecaj na okoliš i troškovi u razdoblju 2020.-2034. godine 32

8. ZAKLJUČAK 33

LITERATURA 34

PRILOZI 36

POPIS SLIKA

Slika 1. Ukupna emisija stakleničkih plinova u SAD-u 2
Slika 2. Postotak emisije štetnih plinova za određene vrste prometa 2
Slika 3. Postotak proizvodnje vodika iz različitih resursa 4
Slika 4. PEM gorivni članak 6
Slika 5. Autobus s gorivnim člancima i baterijama 7
Slika 6. Spremnik za pohranu vodika 9
Slika 7. Autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima u Europi 10
Slika 8. ZET tramvaj 18
Slika 9. Zagrebački glavni kolodvor 18
Slika 10. Zagrebačka uspinjača 19
Slika 11. ZET autobus 19
Slika 12. Punionica prirodnog plina za ZET autobuse 20
Slika 13. Zastupljenost autobusa s obzirom na pogonsko gorivo 21
Slika 14. Princip rada punionice vodika 23
Slika 15. Prva hrvatska punionica vodika 24

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne značajke vodika 3
Tablica 2. Prednosti autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima 8
Tablica 3. Osnovne značajke autobusa na pogon vodikom 8
Tablica 4. Javni gradski prijevoz na vodik u Italiji 11
Tablica 5. Javni gradski prijevoz na vodik u Njemačkoj 11
Tablica 6. Gradovi u Njemačkoj gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik 11
Tablica 7. Javni gradski prijevoz na vodik u Nizozemskoj 12
Tablica 8. Javni gradski prijevoz na vodik u Francuskoj 12
Tablica 9. Gradovi u Francuskoj gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik 12
Tablica 10. Javni gradski prijevoz na vodik u Belgiji 13
Tablica 11. Gradovi u Belgiji gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik 13
Tablica 12. Javni gradski prijevoz na vodik u Danskoj 13
Tablica 13. Gradovi u Danskoj gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik 13
Tablica 14. Javni gradski prijevoz na vodik u Austriji 14
Tablica 15. Gradovi u Austriji gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik 14
Tablica 16. Dražve i gradovi s planom uvođenja autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima 14
Tablica 17. Javni gradski prijevoz na vodik u UK, Švicarskoj i Norveškoj 15
Tablica 18. Gradovi u Ujedinjenom Kraljevstvu gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik . 15
Tablica19. Zaposleni koji putuju na posao prema sredstvu putovanja, prema popisu iz 2011. (%) 17
Tablica 20. Pregled emisija CO_2 prema pogonskom gorivu za 2019. godinu ZET autobusi .. 21
Tablica 21. Analiza troškova za trenutnu zamjenu 10% autobusa pogonjenih dizelom 25
Tablica 22. Analiza prosječnih godišnjih troškova zamjene 35% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima i ukupne instalacije punionica vodika 27
Tablica 23. Analiza ukupnih petogodišnjih troškova zamjene 35% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima i potpune instalacija punionica vodika 28
Tablica 24. Analiza prosječnih godišnjih troškova zamjene ostatka autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima 29

Tablica 25. Analiza ukupnih petogodišnjih troškova zamjene ostatka autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima 29
Tablica 26. Ukupni troškovi zamjene autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima + troškovi instalacije punionica vodika 30
Tablica 27. Analiza prosječnih godišnjih troškova zamjene autobusa pogonjenih stlačenim prirodnim plinom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima..... 31
Tablica 28. Analiza ukupnih četverogodišnjih troškova zamjene autobusa pogonjenih stlačenim prirodnim plinom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima 31
Tablica 29. Ukupni troškovi u razdoblju 2020.-2034. 32

SAŽETAK

Svijet se danas nalazi u teškoj situaciji u pogledu onečišćenja okoliša. Veliki dio tome pridonosi prometna industrija koja čini otprilike 30% ukupne emisije stakleničkih plinova. Zato je danas politika u cijelome svijetu, pa tako i u Europskoj Uniji (EU) čija je članica i Republika Hrvatska, usmjerena u smanjenju štetnih emisija ugljikovog dioksida (CO_2) i ostalih stakleničkih plinova za bolju i zdraviju budućnost kako planeta Zemlje tako i stanovnika koji na njoj žive.

Dio ovoga problema je i javni gradski prijevoz s korištenjem današnjih konvencionalnih autobusa koji pridonose onečišćenju zraka. Kao alternativa ovakvim autobusima nameće se vodik, odnosno autobusi pogonjeni vodikovim gorivnim člancima. Takvi bi autobusi, uz proizvodnju vodika korištenjem obnovljivih izvora energije (OIE), u potpunosti bili bez popratnih štetnih emisija CO_2.

U ovom završnom radu istraženo je trenutno stanje javnog gradskog prijevoza temeljenog na vodiku u EU. Također, provedena je analiza emisija CO_2 u Gradu Zagrebu gdje se naglasila prometna industrija i javni gradski prijevoz. Za kraj, predložen je scenarij parcijalnog uvođenja autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima kao i okvirna analiza troškova.

Ključne riječi: vodik, autobus, gorivni članak, CO_2, javni gradski prijevoz

SUMMARY

The world today is in a difficult situation in terms of environmental pollution. A large part of this is contributed by transport industry, which accounts for approximately 30% of total greenhouse gas emissions. That is why today the policy all over the world, including European Union (EU), of which Republic of Croatia is a member, is aimed at reducing harmful emissions of carbon dioxide (CO_2) and other greenhouse gases for a better and healthier future for both the planet Earth and its inhabitants.

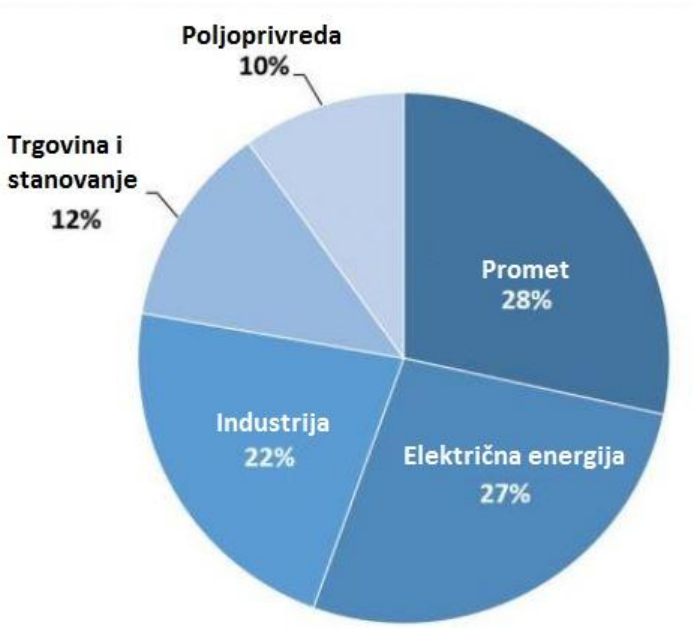
Part of this problem is a public city transport using todays conventional buses that contribute to air pollution. As an alternative to such buses, hydrogen is imposed, i.e. hydrogen fuel cells powered buses. Such buses, with the hydrogen production using renewable energy sources (RES), would operate completely without any harmful CO_2 emissions.

This thesis explores the current state of hydrogen-based public transport in the EU. Also, an analysis of CO_2 emissions was conducted in the City of Zagreb, emphasizing the transport industry and public city transport. Finally, a scenario of partial introduction of hydrogen fuel cells powered buses as well as a framework cost analysis was proposed.

Key words: hydrogen, bus, fuel cell, CO_2, public transport

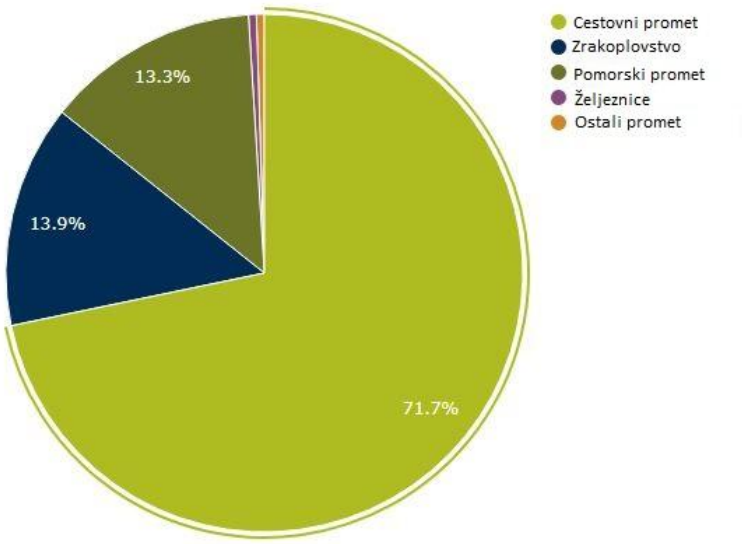
1. UVOD

Posljedice koje se javljaju u pogledu klimatskih promjena, a koje su sve opasnije za prirodu i čovjeka, usko su povezane sa suvremenim životom u kojemu danas živimo. Veliki doprinos klimatskim promjenama ima popratna emisija CO_2. Globalna emisija jedan je od najvećih problema s kojima se čovjek danas susreće. CO_2 je staklenički plin za koji se smatra da je uzrok više od 63% globalnog zatopljena koji su uzrokovali ljudi [1]. Naime, današnja koncentracija CO_2 prelazi preko 400 ppm što je najveća vrijednost koja se javlja stoljećima unazad. Gledajući od 1950. godine do danas, koncentracija CO_2 je rapidno porasla s 300-310 ppm do današnjih 400 ppm. Kao posljedica velikog porasta koncentracije CO_2, kao i drugih stakleničkih plinova, među kojima je značajno naglasiti metan (CH_4) i dušikov oksid (NO_x), dolazi do porasta temperature zemlje [2]. Trenutačna prosječna temperatura na svjetskoj razini viša je za 0,85 °C nego krajem 19. stoljeća. Znanstvenici smatraju da je porast za 2 °C u odnosu na temperaturu iz predindustrijskog doba granična vrijednost nakon koje postoji mnogo veći rizik da će doći do opasnih i potencijalno katastrofalnih promjena okoliša na svjetskoj razini. Stoga je međunarodna zajednica prepoznala potrebu zadržavanja globalnog zatopljenja ispod 2 °C [1]. Kako bi se to ostvarilo, između ostaloga, ključ je prijeći s fosilnih goriva na oblike goriva koja neće emitirati CO_2. Izvrsna alternativa fosilnim gorivima je vodik u sprezi s OIE. Ovo rješenje nema nikakav štetan učinak na okoliš, ne emitiraju se štetni plinovi, a OIE se nalaze u prirodi u neograničenim količinama. Zbog svoje intermitencije, uz korištenje OIE nužno je riješiti njihovu učinkovitu pohranu. Naime, OIE najčešće stvaraju željenu energiju u određenim vremenskim intervalima, određenom dobu dana, mjeseca ili godine. Zbog toga se javlja potreba razvoja tehnologije koja će pohraniti tu energiju te ju transportirati i koristiti kada je potrebna. Kao odličan nosilac i spremnik energije pokazao se vodik. Energija pohranjena u vodiku ima široku primjenu, posebice u automobilskoj industriji gdje se u gorivnim člancima elektrokemijskim izgaranjem vodika s kisikom proizvodi električna energija za pogon elektromotora. Upravo promet emitira u okoliš najviše štetnih plinova. Tako je, na primjer, u SAD-u, kao što se može vidjeti na Slici 1, prema istraživanju iz 2018. godine, postotak emisije štetnih plinova koja su vezana za promet iznosio 28%, što je najveći postotak u odnosu na ostale industrije koje koriste fosilna goriva te emitiraju CO_2 [3].



Slika 1. Ukupna emisija stakleničkih plinova u SAD-u

Slična situacija događa se i u Europi gdje je promet odgovoran za približno 30% emisije štetnih plinova. Kako se može vidjeti na Slici 2, od prometa, najveći udio u emitiranju štetnih plinova ima upravo cestovni transport s čak 71,7% [4]. Zbog velikog utjecaja na štetnu emisiju prometne industrije, a pogotovo cestovnog prometa koji koristi fosilna goriva, u ovom radu fokus je stavljen na ulogu vodika u smanjenju emisija CO_2 u javnom gradskom prijevozu.



Slika 2. Postotak emisije štetnih plinova za određene vrste prometa

2. VODIK I GORIVNI ČLANCI

2.1 Osnovne značajke vodika

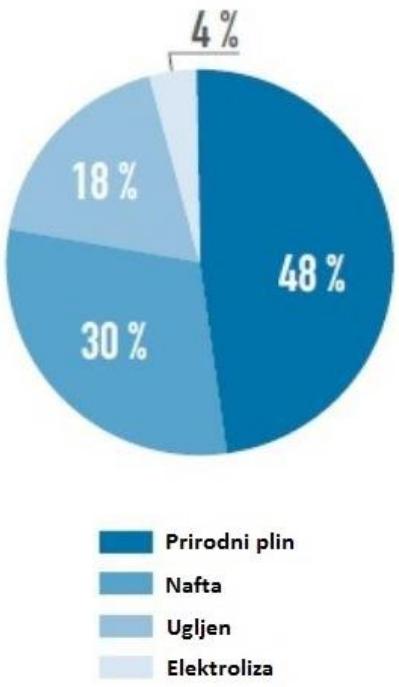
Vodik je neotrovan plin bez boje i mirisa. Kao atom označava se sa slovom H, a kao molekula označava se s H_2. On je najlakši i jedan od najrasprostranjenijih elemenata kojega se nalazi na Zemlji, ali ne kao slobodnog već vezanoga s drugim elementima. Njegova struktura predstavlja najjednostavniju atomsku strukturu, a njegov najčešći izotop ima samo jedan proton i jedan neutron u jezgri te jedan elektron u elektronskom omotaču. Od svih goriva, vodik ima najveću ogrjevnu vrijednost čija gornja ogrjevna vrijednost, (H_g, iznosi 141 MJ kg^{-1}), dok donja, H_d, iznosi 119,6 MJ kg^{-1} [2]. U Tablici 1 mogu se vidjeti osnovne značajke vodika.

Tablica 1. Osnovne značajke vodika [2]

Kemijski element	**Vodik**
Simbol	H
Molekula	H_2
Atomski broj	1
Kemijska skupina	nemetali
Molekularna masa, M	2,016 kg $kmol^{-1}$
Gustoća (u plinovitom stanju), ρ	0,0899 g dm^{-3}
Gustoća (u tekućem stanju), ρ	70,99 g dm^{-3}
Gornja ogrijevna vrijednost, ΔH_{mg} (0 °C)	286,18 MJ $kmol^{-1}$
Donja ogrijevna vrijednost, ΔH_{md} (0 °C)	241,1 MJ $kmol^{-1}$
Temperatura vrelišta, T	-252,77 °C
Kritična temperatura, T_{kr}	-239,9 °C
Kritični tlak, p_{kr}	12,8 bar
Kritična gustoća, ρ_{kr}	31 kg m^{-3}

2.2 Proizvodnja vodika

Iako ga se ne nalazi slobodnog na zemlji, njegova je proizvodnja dobro poznata i komercijalno dostupna. Tako na primjer, može se zagrijati vodu na 3000 °C pri čemu će se više od polovice molekule vode razložiti na molekule kisika i vodika. Danas se vodik najčešće proizvodi reformiranjem ugljikovodika (čak 96%), a preostalih 4% proizvodi se elektrolizom vode kako je prikazano na Slici 3. Razlog tome je činjenica da je postupak reformiranja 3-4 puta jeftiniji od elektrolize vode. Vodik dobiven reformiranjem ugljikovodika vodenom parom naziva se sivi vodik i njegov je nedostatak taj što se ovom tehnologijom proizvodnje kao nusprodukt u okoliš ispušta štetni CO_2. Nasuprot sivom vodiku, vodik dobiven elektrolizom vode korištenjem OIE naziva se zeleni vodik, vodik dobiven potpuno bez popratnih štetnih emisija CO_2. Zato se danas teži u što većem postotku proizvesti zeleni vodik kako se ne bi stvarala popratna štetna emisija CO_2 u okoliš [2] [5].



Slika 3. Postotak proizvodnje vodika iz različitih resursa

2.3 Korištenje vodika – gorivni članci

Gorivni članci su uređaji u kojima se elektrokemijskim izgaranjem vodika s kisikom dobiva električna energija kao glavni produkt, te toplina i voda kao jedini nus produkti. Gorivni članak se sastoji od dviju elektroda, katode i anode, na kojima su naneseni katalizatori. Između anode i katode nalazi se elektrolit koji može biti tekući, želatinozni ili kruti. Elektrode i elektrolit smješteni su između bipolarnih ploča koje osiguravaju mehaničku strukturu, distribuciju vodika i kisika i odnose višak reaktanata i vode.

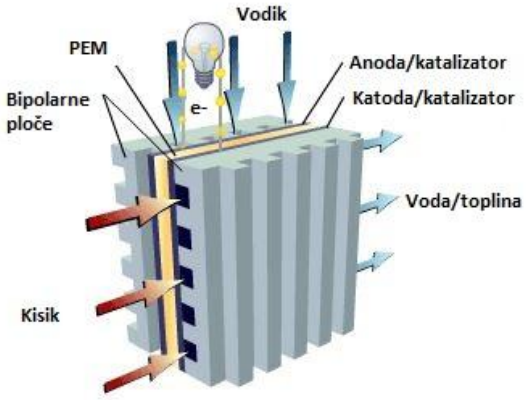
Princip rada gorivnoga članka je jednostavan. Na primjeru gorivnoga članka s protonski izmjenjivom membranom (engl. Proton Exchange Membrane – PEM), vodik se dovodi na anodu gdje se razlaže na atome vodika i dalje na protone i elektrone. S druge strane membrane, na katodi, molekula kisika se dijeli na atome. Uslijed ove raspodjele vodika i kisika na anodu i katodu, dolazi do formiranja razlike potencijala na elektrodama. Vodikova elektroda, anoda, postat će negativna zbog viška elektrona dok će kisikova elektroda, katoda, biti pozitivna zbog manjka dva elektrona u ljusci atoma kisika. Slika 4 prikazuje princip rada PEM gorivnoga članka. U jednadžbama koje slijede prikazana je masena bilanca, te reakcije koje se odvijaju na elektrodama.

Masena bilanca: $1\ kg\ H_2 + 8\ kg\ O_2 \rightarrow 9\ kg\ H_2O$ (1)

Reakcija na anodi: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$ (2)

Reakcija na katodi: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ (3)

Reakcija članka: $H_{2\,(g)} + \frac{1}{2} O_{2\,(g)} \rightarrow 2H_2O_{\,(l)}$ + istosmjerna električna energija + toplina

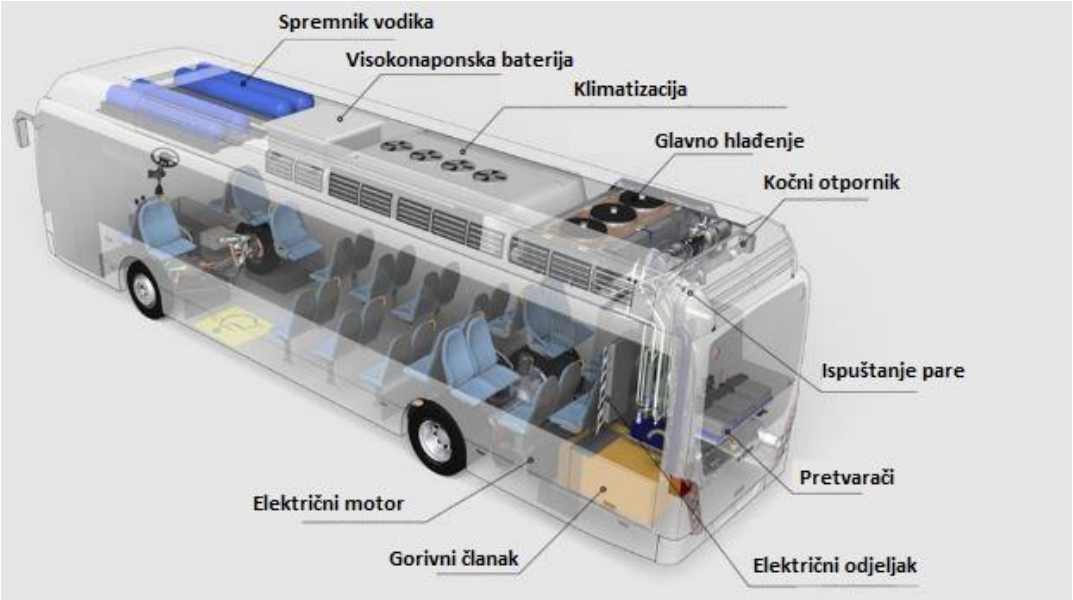


Slika 4. PEM gorivni članak [6]

Budući da je membrana električki vodljiva za protone (H^+), a izolator za elektrone (e^-), doći će do gibanja protona kroz membranu na drugu stranu te gibanja elektrona kroz električni vodljive elektrode, kroz strujne kolektore, i kroz vanjski strujni krug, proizvodeći tako istosmjernu električnu energiju, te se vraćaju na drugu stranu membrane. Na mjestima katalizatora između membrane i katode elektroni se susreću s protonima koji su prošli kroz membranu kao i s kisikom koji se nalazio na katodi. Tako gorivni članak proizvodi istosmjernu električnu energiju, vodu i toplinu kao nus produkt [2].

3. AUTOBUSI NA POGON VODIKOVIM GORIVNIM ČLANCIMA

Autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima su električni autobusi koji koriste gorivne članke za proizvodnju električne energije potrebne za pogon elektromotora. Vodik koji se koristi u gorivnim člancima najčešće se pohranjuje u komprimiranim spremnicima, na krovovima autobusa, dok se kisik uzima slobodan iz zraka. Najčešće se u takvim autobusima, uz gorivne članke, u sustavu nalaze i baterije. U ovakvoj konstrukciji autobusa gorivni članak proizvodi električnu energiju za pogon vozila dok baterije osiguravaju vršnu snagu motorima u trenucima potrebe za svladavanjem nagiba ili velikih ubrzanja. Primjer autobusa s gorivnim člancima i baterijama može se vidjeti na Slici 5.



Slika 5. Autobus s gorivnim člancima i baterijama [7]

Kao nusprodukt u gorivnim člancima javljaju se, kao što je rečeno, voda i toplina tako da se ovdje govori o autobusima koji ne proizvode štetne emisije. Proizvedena voda napušta autobuse kroz ispušnu cijev u obliku vodene pare, a toplina se pohranjuje i koristi za održavanje toplinske udobnosti putnika i osigurava značajno povećanje energetske učinkovitosti [8]. Iako ovakvi autobusi ne proizvode štetne emisije, da bi oni u potpunosti bili zeleni ovisi i o načinu na koji se vodik koji se koristi u gorivnim člancima proizvodi. Kao što je rečeno, postoji sivi vodik koji se dobiva reformiranjem ugljikovodika vodenom parom te zeleni vodik koji se proizvodi elektrolizom vode korištenjem OIE. Pošto se kod sivog vodika kao nusprodukt javlja CO_2, teži se korištenju zelenog vodika. Ovdje gorivni članci također funkcioniraju kao ugrađeni punjači, pružajući proizvedenu električnu energiju baterijama kako bi se one punile dok se autobus kreće. Ovime se može produžiti domet autobusa do čak 560 km prije potrebe za punjenjem. U Tablici 2 istaknute su neke od prednosti autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima. Što se tiče samog punjena autobusa vodikom, za autobus dug 18,3 metara, koji osigurava 52 sjedala, potrebno je 12-20 minuta, a upola manje vremena (6-10 minuta) za autobus dug 12,2 metra koji osigurava 40 sjedala [9].

Tablica 2. Prednosti autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima

• nulta emisija na izlazu iz ispušnih cijevi
• poboljšanje kvalitete zraka
• domet >300 kilometara između punjenja vodikom
• može se napuniti za manje od 10 minuta
• usporediv s tradicionalnim autobusima (npr. ubrzanje, brzina, svladavanje nagiba)
• udobnost putnika zbog smanjene buke i ugodne vožnje
• dokazana trajnost, s vijekom trajanja gorivnih članaka većim od 30 000 sati

3.1 Osnovne značajke autobusa na pogon vodikom

Osnovne značajke autobusa na pogon vodikom prikazane su u Tablici 3.

Tablica 3. Osnovne značajke autobusa na pogon vodikom [10][11] [12]

Elektromotor	
nazivna snaga	160-210 kW
nazivni moment	1,4-2 Nm
Gorivni članci	
broj svežanja	dva svežnja gorivnih članaka
snaga jednog svežnja	otprilike 100 kW
potrošnja vodika pri nazivnoj snazi	8-9 kg / 100 km
Vodik	
pohrana	tlačni spremnici vodika
broj spremnika	4-10
količina pohranjenog vodika	30-60 kg
tlak u spremniku	250-350 bar
Baterija	
snaga baterije	100-250 kW
Sustav hlađenja	električni ventilatori
Cijena autobusa	~ 450.000,00 €

Na Slici 6 može se vidjeti tipičan spremnik za pohranu vodika korišten u autobusima na pogon vodikom.



Slika 6. Spremnik za pohranu vodika [2]

4. JAVNI GRADSKI PRIJEVOZ TEMELJEN NA VODIKU U EUROPSKOJ UNIJI

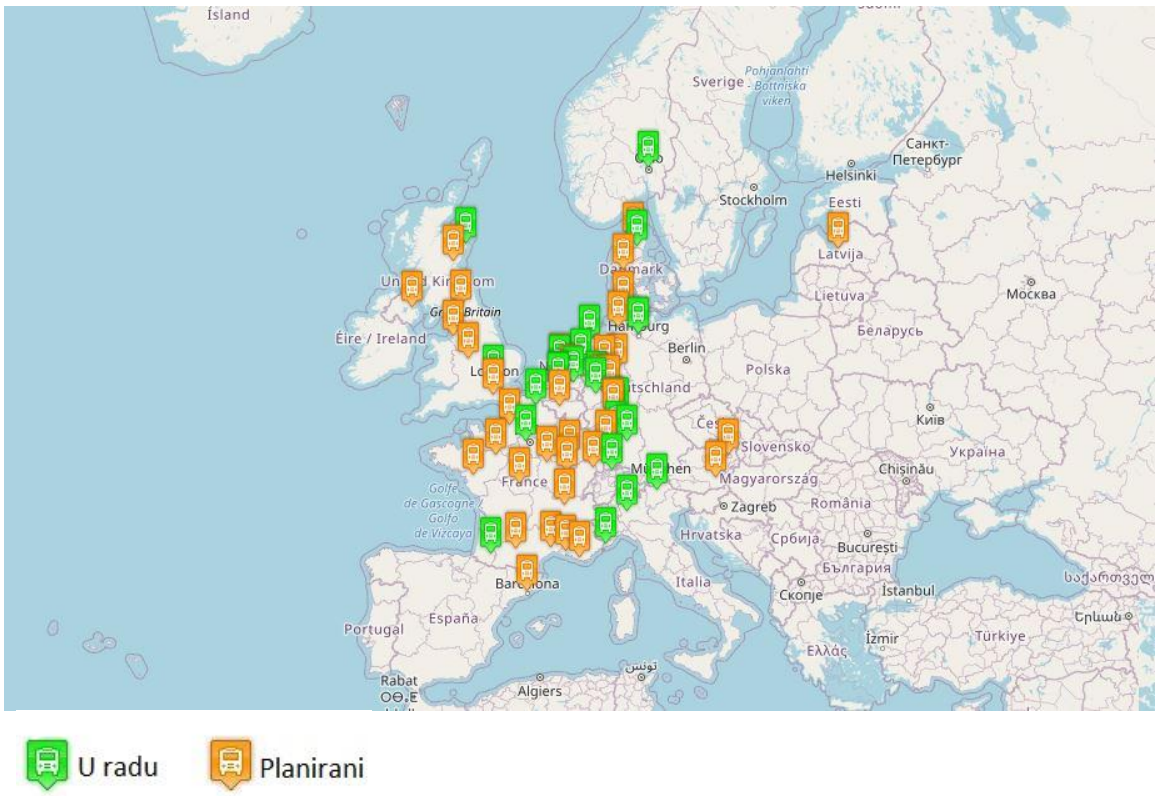
Iako su još uvijek konvencionalni autobusi za javni gradski prijevoz pogonjeni motorima s unutarnjim izgaranjem najčešće zastupljeni, to se danas ubrzano mijenja kroz trend uvođenja autobusa za javni gradski prijevoz s alternativnim gorivima koji uvelike smanjuju štetne emisije ili ih dovode i na samu nulu. Među alternativnim rješenjima, zbog svoje učinkovitosti i bez popratnih emisija CO_2 kao i drugih prednosti, u nekim gradovima EU mogu se već pronaći autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima. Ovakvi autobusi sve su češće rješenje u gradskom prijevozu diljem svijeta. Javlja se visoka ekonomičnost pri potrošnji vodika u odnosu na dizel. Naime, za prijeđenih 100 km 12 metara dugih autobusa pogonjenog vodikovim gorivnim člancima potrebno je otprilike 9 kg vodika, što je ekvivalentno 30 litara dizela. Za autobus iste dužine, pogonjen dizelom, za prijeđenih 100 km potrebno je u prosijeku 40,9 litara dizela [13]. Prosječna cijena jednog kilograma zelenog vodika je 3,96 €, a sivoga 1,19 € [14]. Što se tiče dizela, njegova prosječna cijena u Europi iznosi 1,06 € [15]. Ako se za korištenje uzme zeleni vodik, koji ne emitira CO_2, za prijeđenih 100 km 12 metara

dugog autobusa pogonjenog vodikovim gorivnim člancima bit će potrebno 35,64 €, a za isti takav autobus, pogonjen dizelom, 43,35 €, odnosno 7,71 € više od autobusa na vodik za istu kilometražu.

Države članice EU koje su uvele autobuse na pogon vodikovim gorivnim člancima u svoj javni gradski prijevoz u nekim gradovima su: Austrija, Belgija, Danska, Francuska, Italija, Nizozemska i Njemačka.

Od ostalih država u Europi, koje nisu članice EU mogu se spomenuti Ujedinjeno Kraljevstvo (UK), Norveška i Švicarska [8].

Na Slici 7 prikazana je karta Europe s gradovima u kojima su autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima već puštena na ceste kao i gradovi u kojima ih se uskoro planira uključiti.



Slika 7. Autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima u Europi [8]

4.1 Italija

Italija je u tri svoja grada uvela u javni gradski prijevoz autobuse na pogon vodikovim gorivnim člancima. To su, kako je prikazano u Tablici 4, Bolzano, Milano i San Remo.

Tablica 4. Javni gradski prijevoz na vodik u Italiji [8]

	Bolzano	**Milano**	**San Remo**
broj autobusa	5	3	3
u planu	12 autobusa, 2020/21. godine	-	-

4.2 Njemačka

Njemačka je autobuse na pogon vodikovim gorivnim člancima uvela u Hamburgu, Wuppertalu, Kölnu, Frankfurtu, Wiesbadenu, Stuttgartu i Karlsruheu. Tablica 5 prikazuje javni gradski prijevoz temeljen na vodiku u Njemačkoj.

Tablica 5. Javni gradski prijevoz na vodik u Njemačkoj [8]

	Hamburg	**Wuppertal**	**Köln**	**Frankfurt + Wiesbaden**	**Stuttgart**	**Karlsruhe**
broj autobusa	2	10	35	15	4	2
u planu	-	10 autobusa	12 autobusa	-	-	-

U Tablici 6 mogu se vidjeti gradovi u Njemačkoj gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik.

Tablica 6. Gradovi u Njemačkoj gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik [8]

	Sjeverna Frizija	**Bielefeld**	**Oberberg**	**Wiesbaden**	**Rhein - Main**
autobusi u planu	2 autobusa 2020. god	4 autobusa	1 autobus	10 autobusa	10 autobusa

4.3 Nizozemska

U Nizozemskoj su se četiri grada (Tablica 7) odlučila za uvođenje autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima, Rotterdam, Eindhoven, Apeldoorn i Groningen. Također, u

nizozemskoj provinciji, Južna Nizozemska, uvedeno je u lipnju 2020. godine 4 autobusa, a u 2021.godini tamo se planira uvesti još 20 autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima.

Tablica 7. Javni gradski prijevoz na vodik u Nizozemskoj [8]

	Rotterdam	**Eindhoven**	**Apeldoorn**	**Groningen**
broj autobusa	2	2	1	2
u planu	4 autobusa	-	-	20

4.4 Francuska

U Francuskoj se autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima mogu pronaći u Versaillesu, Lensu i Pauu. Tablica 8 prikazuje javni gradski prijevoz na vodik u Francuskoj.

Tablica 8. Javni gradski prijevoz na vodik u Francuskoj [8]

	Versailles	**Lens**	**Pau**
broj autobusa	3	6	8
u planu	4 autobusa	6 autobusa	-

Tablica 9 prikazuje gradove u Francuskoj gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik.

Tablica 9. Gradovi u Francuskoj gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik [8]

	Rouen	**Le Mans**	**Pau**	**Nantes**	**Chateauroux**	**Toulouse**	**Auxerre**
broj autobusa u planu	3	10	8	2	5	13	5

	Chaumont	**Dijon**	**Lyon**	**Toulon**	**Montpellier**	**Strasbourg**
broj autobusa u planu	3	27 (2022.), 173 (2030.)	13	7	21 (2023.), 30 (2025.)	30

4.5 Belgija

Kao što se može vidjeti u Tablici 10, Antwerp je trenutno jedini grad u Belgiji gdje su u javni gradski prijevoz uvedeni autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima.

Tablica 10. Javni gradski prijevoz na vodik u Belgiji [8]

	Antwerp
broj autobusa	5

Tablica 11 prikazuje grad Charleroi koji u 2021. godini planira uvesti 10 ovakvih autobusa.

Tablica 11. Gradovi u Belgiji gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik [8]

	Charleroi
broj autobusa u planu	10 (2021.)

4.6 Danska

U Danskoj, kao i u Belgiji, trenutno samo jedan grad koristi autobuse na pogon vodikovim gorivnim člancima. Autobusi djeluju u Aalborgu od ožujka 2020. godine. Herning u planu ima uvesti 10 autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima. Tablica 12 prikazuje trenutni javni gradski prijevoz temeljen na vodiku u Danskoj, dok Tablica 13 prikazuje gradove gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik.

Tablica 12. Javni gradski prijevoz na vodik u Danskoj [8]

	Aalborg
broj autobusa	3 (od ožujka 2020.)

Tablica 13. Gradovi u Danskoj gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik [8]

	Herning
broj autobusa u planu	10

4.7 Austrija

2020. godine, kao što se može vidjeti u Tablici 14, u Beču su uvedeni autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima.

Tablica 14. Javni gradski prijevoz na vodik u Austriji [16]

	Beč
broj autobusa	12
u planu	10 autobusa (2023.)

Tablica 15 prikazuje gradove u Austriji gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik.

Tablica 15. Gradovi u Austriji gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik [8]

	Graz
broj autobusa u planu	7

4.8 Ostale države članice EU

Iz Tablice 16 vidi se kako Latvija i Španjolska imaju u planu u neke gradove uvesti u javni gradski prijevoz autobuse na pogon vodikovim gorivnim člancima.

Tablica 16. Dražve i gradovi s planom uvođenja autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima [8]

	Španjolska	**Latvija**
	Barcelona	**Riga**
autobusi u planu	**8 (2021.)**	**200**

4.9 UK, Norveška i Švicarska

Iako ove tri države nisu članice EU, vrijedne su spomena u pogledu autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima u javnom gradskom prijevozu. Tablica 17 prikazuje trenutno stanje javnog gradskog prijevoza temeljenom na vodiku u ovim državama, dok Tablica 18 prikazuje gradove u UK u kojima se planiraju uvesti autobusi pogonjeni vodikom.

Tablica 17. Javni gradski prijevoz na vodik u UK, Švicarskoj i Norveškoj [8]

	Ujedinjeno Kraljevstvo		**Švicarska**	**Norveška**
	London	**Aberdeen**	**Aargau**	**Oslo**
broj autobusa	**10**	**6**	**5**	**5**
u planu	**20 (2020.)**	**10 (2020.)**	**-**	**-**

Tablica 18. Gradovi u Ujedinjenom Kraljevstvu gdje se planiraju uvesti autobusi na vodik [8]

UK					
	Engleska			**Škotska**	**Sjeverna Irska**
	Brighton	**Liverpool**	**Birmingham**	**Dundee**	**Belfast**
autobusi u planu	**20**	**25**	**20**	**12**	**3**

5. ZAGREB I CO_2

Kako ni ostatak svijeta, tako ni Hrvatsku nije zaobišao sve veći problem štetnih emisija CO_2 i sve popratne posljedice koje s njima dolaze. Kao glavni i najmnogoljudniji grad u Hrvatskoj, Zagreb se susreće s problemom sve većeg povišenja koncentracije štetnih čestica u zraku. Zagreb je čvorište europskih prometnih koridora. Kroz glavni grad prolaze cestovni i željeznički koridori, X (Salzburg-Ljubljana-Zagreb-Beograd-Thessaloniki) i Vb (Rijeka-Zagreb-Budimpešta) [17]. Također, kroz središte Zagreba prolazi i željeznička pruga kojom se odvija putnički i cjelokupni teretni promet. Uz to, autocestovni državni i međunarodni pravci imaju ishodište na zagrebačkoj obilaznici. Također, osnovnu uličnu mrežu grada karakterizira nedovoljna propusna moć u vremenima vršnog opterećenja [17]. Iako ovakva povezanost nosi mnoge prednosti i mogućnosti za napredak u raznim društvenim sferama, zbog velike količine slijevanja raznih motornih vozila dolazi do velikog povišenja koncentracije štetnih čestica u zraku. Isto tako, trend povećanja životnog standarda u svijetu prati i Zagreb stoga se na prometnicama može vidjeti velik broj motornih vozila zbog sve veće potrebe za mobilnosti građana što dodatno pridonosi onečišćenju zraka. Onečišćeni zrak u pogledu povećanja koncentracije stakleničkih plinova, kao što je već rečeno, dovodi do globalne promjene klime na Zemlji, njenog zagrijavanja i velike opasnosti za budućnost života na planetu. Uz to, on je sve veći javno zdravstveni problem koji ima stalni i dugotrajni utjecaj na zdravlje stanovništva te bi stoga očuvanje kakvoće zraka trebao biti jedan od primarnih zadataka kojima bi se sve sfere života u Zagrebu trebale baviti [17]. Nažalost, posljednjih dvadeset godina u Hrvatskoj je, a pogotovo u Zagrebu prisutan uzlazni trend emisije CO_2, ponajviše uzrokovan cestovnim prometom pa je tako koncentracija CO_2 na nekim križanjima u Zagrebu 35 mg/m^3 što je 3,5 puta više od svjetskih standarda. Kao posljedica zagrijavanja Zemljine atmosfere zbog povećanja koncentracije stakleničkih plinova, u Zagrebu je od deset najtoplijih godina od početka 20. stoljeća, čak njih sedam zabilježeno od 2000. godine [18]. Cestovni promet prednjači u odnosu na druge vrste prometa i najviše sudjeluje u stvaranju štetnih emisija. Da bi se kakvoća zraka u Zagrebu poboljšala, kao rješenje se nudi prelazak vozila na konvencionalna goriva koji proizvode CO_2 na električna vozila koji ne stvaraju nikakve štetne plinove i samim time ne zagađuju okoliš. Pošto takva promjena na cestama ovisi i o kupovnoj moći građana grada Zagreba, kao prvi korak ka smanjenju onečišćenja zraka nameću se promjene u pogledu javnog gradskog prijevoza. Ovdje vodik, koji se dokazao učinkovitim u mnogim gradovima EU, može poslužiti kao jedan od prvih koraka smanjenju onečišćenja zraka u Zagrebu. Parcijalnim uvođenjem

autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima u javni gradski prijevoz, a tijekom vremena i potpunom zamjenom postojeće flote autobusima pogonjenima na vodik, kakvoća zraka u Zagrebu se može poboljšati. U Tablici 19 može se vidjeti kako zaposleni putuju na posao prema sredstvu putovanja. Iz tablice se može očitati da 41,3% zaposlenih, procijenjenih temeljem popisa iz 2011. godine, na posao putuje javnim gradskim prijevozom [17]. Poticanje građana na vožnju javnim gradskim prijevozom radi smanjenja zagađenja zraka i okoliša može se ostvariti edukacijom na štetne učinke za grad koje stvaraju njihovi automobili. Da bi se taj postotak dodatno povećao treba se osigurati bolji komfor u javnom gradskom prijevozu, a autobusi na pogon vodikom, uz to što ne ispuštaju nikakve štetne plinove u okoliš, omogućavaju udobnost putnika zbog smanjene buke i ugodne vožnje.

Tablica 19. Zaposleni koji putuju na posao prema sredstvu putovanja, prema popisu iz 2011. (%) [17]

Prijevozno sredstvo	**Osobni automobil**	**Javni gradski prijevoz (željeznica, autobus, tramvaj)**	**Motocikl**	**Bicikl**	**Pješice**	**Automobil i motocikl**
Udio (%)	51,0	41,3	0,6	3,3	12,2	51,3

6. JAVNI GRADSKI PRIJEVOZ U ZAGREBU

U Zagrebu se javni gradski prijevoz može obavljati autobusima, tramvajima, željeznicom i uspinjačom.

U gradu Zagrebu danas postoji 15 dnevnih i 4 noćne tramvajske linije bez kojih bi za mnoge građane grada život bio nezamisliv. Tramvajska mreža prostire se gotovo 120 kilometara, točnije, trenutno postoji 58 kilometara dvokolosiječnih pruga [17]. Slika 8 prikazuje ZET-ov tramvaj.



Slika 8. ZET tramvaj (iz osobne arhive)

Uz tramvaje, gradom, ali i okolicom može se putovati i željeznicom. Na području Grada Zagreba putnici mogu ulaziti/izlaziti iz vlakova na 17 službenih mjesta (kolodvora i stajališta). Na Slici 9 može se vidjeti zagrebački glavni kolodvor.



Slika 9. Zagrebački glavni kolodvor (iz osobne arhive)

Zagrebačka uspinjača, sa Slike 10, najstarije je prijevozno sredstvo organiziranoga javnog prijevoza putnika u Zagrebu. Ona spaja Donji i Gornji grad dužinom pruge od 66 metara te je najkraća na svijetu, a vrijeme vožnje u uspinjači je 64 sekunde.



Slika 10. Zagrebačka uspinjača (iz osobne arhive)

Gradske autobuse Gradu Zagrebu osigurava Zagrebački električni tramvaj (ZET). Autobusni promet odvija se na 144 dnevne i 4 noćne linije i time se povezuje cijeli Grad Zagreb međukvartovski, kao i Grad Zagreb s Velikom Goricom i Zaprešićem te općinama Bistra, Luka i Stupnik. Trenutno je u pogonu 438 autobusnih vozila, prosječne starosti 11 godina [19].



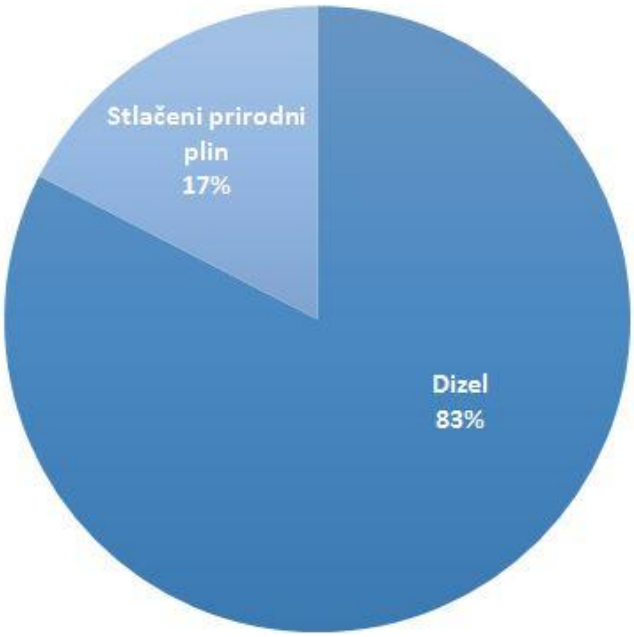
Slika 11. ZET autobus (iz osobne arhive)

7. GRADSKI AUTOBUSI U ZAGREBU – EMISIJA CO_2

U Gradu Zagrebu danas je u pogonu 438 autobusnih vozila prosječne starosti od 11 godina. Kako su stari dizelski motori značajniji izvori onečišćenja zraka, obnova i pomlađivanje voznog parka novim tehnologijama koje u puno manjoj mjeri onečišćuju zrak ili mu čak ne štete ni u kakvom pogledu djelovalo bi pozitivno u pogledu smanjenja emisija štetnih plinova u cestovnom prometu. Prvi korak k tome Grad Zagreb napravio je 2009. godine kada je ZET, uz tradicionalne autobuse kojima je pogonsko gorivo bio dizel, uveo na ceste i 60 autobusa na prirodni plin. Do 2019. godine ukupan broj autobusa pogonjeni stlačenim prirodnim plinom popeo se na 76, dok je 360 autobusa bilo pogonjeno dizelom [20]. Na Slici 12 može se vidjeti prva punionica prirodnog plina za autobuse ZET-a u Podsusedu. Iako je uvođenje autobusa na stlačeni prirodni plin pomak ka smanjenju štetnih emisija iz autobusa, uz to što su u velikoj manjini, kao što se može vidjeti na Slici 13, takvi su autobusi još uvijek izvori onečišćenja zraka zbog ispuštanja štetnih plinova u atmosferu. Zato bi u današnjem svijetu, gdje više nema mjesta štetnim plinovima, trebalo težiti novim tehnologijama koje osiguravaju prijevoz građana bez ikakvih opasnosti i posljedica za okoliš.



Slika 12. Punionica prirodnog plina za ZET autobuse [21]



Slika 13. Zastupljenost autobusa s obzirom na pogonsko gorivo

7.1 Emisija CO_2 u 2019. godini

Prema podacima iz ZET-a [20], 2019. godine je Grad Zagreb osigurao građanima povezanost gradom s ukupno 436 autobusa. Od toga, 360 autobusa je za pogonsko gorivo koristilo dizel dok je 76 autobusa bilo pogonjeno stlačenim prirodnim plinom. Ovih 436 autobusa ukupno je prevalilo 29.369.572 km te je emitiralo 37.434.863 kg CO_2. Tablica 20 daje pegled emisija CO_2 prema pogonskom gorivu za 2019. godinu.

Tablica 20: Pregled emisija CO_2 prema pogonskom gorivu za 2019. godinu ZET autobusi

Pogonsko gorivo	**Broj autobusa**	**Prevaljeni kilometri**	**Potrošeno gorivo [l;kg]**	**Emisija CO_2 [kg]**
Dizel	360	25.102.953,00	12.201.206,00	32.015.965,00
Stlačeni prirodni plin	76	4.266.619,00	2.220.860,00	5.418.898,00
∑	436	29.369.572,00	14.422.066,00	37.434.863,00

Dizel autobusi su u 2019. godini u Zagrebu prevalili ukupno 25.102.953 km te potrošili 12.201.206 l goriva. Time su u zrak emitirali ukupno 32.015.965 kg CO_2. Važno je naglasiti

da su autobusi različite starosti te zbog napretka tehnologije noviji autobusi ne emitiraju jednaku količinu CO_2 kao i stariji, ali ako se uzme prosječna vrijednost, jedan autobus s dizelom kao pogonskim gorivom godišnje u Gradu Zagrebu prijeđe ukupno 69.730,425 km i potroši ukupno 33.892,24 l goriva. Prema takvom prosjeku jedan autobus pogonjen dizelom godišnje u okoliš emitira 88.933,24 kg CO_2.

Autobusi pogonjeni stlačenim prirodnim plinom su u 2019. godini u Zagrebu prevalili ukupno 4.266.619 km te potrošili 2.220.860 l (kg) goriva. Ukupna emisija CO_2 ovakvih autobusa u 2019. godini za Grad Zagreb iznosila je 5.418.898 kg. Također, kao i za autobuse pogonjene dizelom, autobusi pogonjeni stlačenim prirodnim plinom razlikuju se po starosti pa je i ovdje po prosjeku jedan autobus u 2019. godini prevalio 56.139,72 km i potrošio 29.221,84 l (kg) goriva. Što se tiče emisije CO_2, po prosjeku, jedan autobus pogonjen stlačenim prirodnim plinom u Gradu Zagrebu je 2019. godine emitirao 71.301,29 kg CO_2.

7.2 Značenje emisije CO_2 ZET autobusa

Brojke koje govore o emisiji CO_2 autobusa pogonjenih dizelom te onih pogonjenim stlačenim prirodnim plinom u Gradu Zagrebu mogu, pomoću kalkulatora [22], dobiti i neko značenje.

Kako je navedeno, jedan autobus pogonjen dizelom u Gradu Zagrebu prosječno emitira u okoliš godišnje 88.933,24 kg CO_2. Takva emisija CO_2 je, na primjer, ekvivalentna emisiji stakleničkih plinova za 19,2 osobnih automobila godišnje. Kako je utjecaj sadnje drveća za smanjenje zagađenja okoliša sve popularnije, za ovakvu količinu CO_2, koju emitira jedan autobus pogonjen dizelom, bilo bi potrebno 1471 sadnica stabala godišnje uzgajanih 10 godina kako bi se iz zraka odvojila emisija CO_2 jednog ovakvog autobusa.

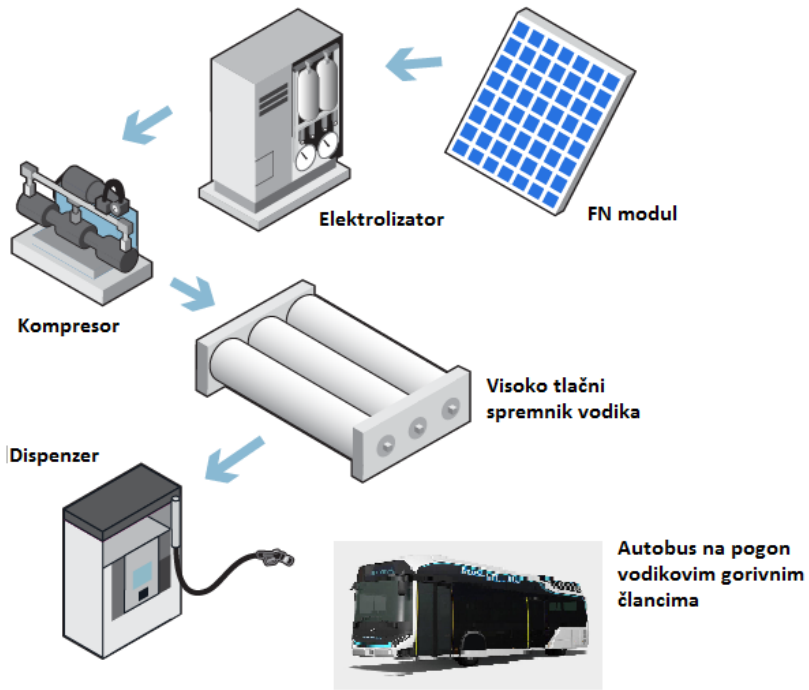
Što se tiče autobusa pogonjenih stlačenim prirodnim plinom, kako je rečeno, jedan takav prosječan autobus u Gradu Zagrebu emitira 71.301,29 kg CO_2 godišnje u okoliš. To bi bilo ekvivalentno 15,4 osobnih automobila godišnje, dok, što se tiče sadnje drveća za smanjenje zagađenja okoliša, za ovakvu emisiju jednog autobusa bilo bi potrebno posaditi 1179 sadnica stabala godišnje uzgajanih 10 godina kako bi se iz zraka odvojila emisija CO_2.

Dakle, da se poništi štetno djelovanje autobusa u Gradu Zagrebu, za jednu godinu prometa, potrebno je posaditi ukupno 619.164 sadnica stabala uzgajanih 10 godina. Iako sadnja stabala može pomoći pri smanjenju štetne emisije CO_2, postavlja se pitanje koliko je to brzo

učinkovito. Naime, u teoriji bi se u svijetu trebalo posaditi godišnje 40 milijardi stabala svake godine te bi se trebalo čekati 10 godina da se vidi pozitivan pomak [23]. Temeljem toga, kao odlično rješenje u Gradu Zagrebu, nameće se uvođenje autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima u javni gradski prijevoz kao pomoć pri smanjenju štetnih emisija.

7.3 Punionice vodika u Gradu Zagrebu

Za uvođenje autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima potrebna je dobra infrastruktura. Da bi se osigurao siguran i kontinuirani javni gradski prijevoz temeljen na vodiku potrebno je osigurati autobusima vodik koji će ih pogoniti. To bi omogućila punionica vodika. Princip rada punionice vodika je jednostavan. Kako bi se proizveo zeleni vodik, koji ne stvara nikakve štetne emisije CO_2, potrebno je, npr., preko fotonaponskih (FN) modula sunčevu energiju iskoristiti za dobivanje električne energije potrebne za pogon elektrolizatora koji se smješta u punionicu. U elektrolizatoru vodik se proizvodi elektrolizom vode te se pohranjuje u spremnike za vodik. Na Slici 14 može se vidjeti princip rada punionice vodika.



Slika 14: Princip rada punionice vodika [24]

Trenutno je u Gradu Zagrebu, odnosno u Hrvatskoj, instalirana samo jedna punionica vodika. Ta prva hrvatska punionica vodika nalazi se ispred Laboratorija za energetska postrojenja

Fakulteta strojarstva i brodogradnje te se može vidjeti na Slici 15. Ova punionica vodika zapravo služi za punjenje bicikala pogonjenih vodikom [25].



Slika 15. Prva hrvatska punionica vodika [25]

Punionica vodika za gradske autobuse košta otprilike 1,5 milijuna eura. Takva punionica može napuniti 30ak autobusa dnevno za 6-10 minuta po autobusu [26][27]. Iako se troškovi instalacije punionice vodika čine veliki, EU kao veliki zagovornik zelene politike, može pomoću svojih fondova uvelike pridonijeti ostvarenju ovakvog projekta. Kao primjer sufinanciranja ovakvih projekata može se navesti onaj iz 2018. godine kada je EU sufinancirala instalaciju 8 novih punionica vodika u državama Beneluxa u vrijednosti od € 7.218.875,00 [28].

7.4 Trenutna zamjena 10% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima

Ovakvom zamjenom na samom početku s cesta Grada Zagreba uklonit će se 36 autobusa kojima je pogonsko gorivo dizel. Samim time će na ceste doći jednak broj, njih 36, pogonjenih vodikovim gorivnim člancima. Kako jedan autobus pogonjen dizelom u prosjeku godišnje emitira 88.933,24 kg CO_2, jasno je da bi se ovakvim potezom u Zagrebu iz zraka

uklonilo 3.201.596,64 kg CO_2 u jednoj godini. Kako bi se ovi brojevi stavili u nekakvu perspektivu, 36 autobusa pogonjena vodikovim gorivnim člancima bilo bi ekvivalentno 52.956 posađenih sadnica stabala. Dakako, razlika između autobusa i stabala je velika. Iako su početni troškovi za uvođenje autobusa na pogon vodikovim gorivnim člancima puno veći, dugoročno su isplativiji. Naime, autobusima bi se dobio trenutni učinak koji bi bio trajan dok se sadnjom stabala za učinak treba čekati 10 godina kao što se također za svaku godinu treba saditi ovaj broj stabala.

7.4.1 Analiza troškova trenutne zamjene 10% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima

U Tablici 21 prikazana je analiza troškova. Kako jedna punionica dnevno može napuniti 30 autobusa, za cjelokupnu zamjenu potrebno je instalirati ukupno 15 punionica. Za desetpostotnu trenutnu zamjenu potrebne su dvije punionice, a ostalih 13 mogu se, prema planu, instalirati u prvih 5 godina projekta.

Tablica 21. Analiza troškova za trenutnu zamjenu 10% autobusa pogonjenih dizelom

Punionica vodika	
Cijena jedne punionice za 30 autobusa dnevno [26][27]	€1.500.000
Autobusi pogonjeni dizelom	
Cijena rabljenog autobusa (prema prosjeku starosti od 11 godina) [29]	€28.950
Zarada od prodaje autobusa	€1.042.200
Autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima	
Cijena novih autobusa	€450.000
Troškovi	
Punionica vodika	€3.000.000
Autobusi	€16.200.000
Ukupno	**€19.200.000**
Ukupno uz prodaju starih autobusa	**€18.157.800**

7.5 Potpuna zamjena svih ostalih autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima

Kada bi se prvotno 10% autobusa pogonjenih dizelom zamijenilo autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima, kao što je navedeno i analizirano u prethodnom poglavlju, u Gradu Zagrebu ostalo bi 324 autobusa kojima je pogonsko gorivo dizel. Kako je nagla zamjena svih 324 autobusa vrlo teško ostvariva, potrebno je napraviti plan parcijalnog uvođenja autobusa pogonjenih vodikovim gorivnim člancima koji bi kroz godine zamijenili autobuse pogonjene dizelom. Nakon 10 godina, do 2030. godine, realno je ostvarivo da se plan zamjene autobusa obavi.

7.5.1 Zamjena 35% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima + potpuna instalacija punionica vodika do 2025. godine

Zamjenom 35% autobusa pogonjenih dizelom, što je zapravo njih 113, autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima u prvih pet godina ostvario bi se jednak učinak na okoliš kao da se u Gradu Zagrebu posadilo 166.223 sadnica stabala godišnje idućih pet godina. Drugim riječima, kada bi se 113 autobusa pogonjenih vodikovim gorivnim člancima uvelo u Zagreb na račun autobusa pogonjenih dizelom te se uzelo da se godišnje prosječno zamijeni 22,6 autobusa (23 autobusa četiri godine i 21 autobus jednu godinu) zrak Grada Zagreba bi u 5 godina svake godine bio čišći za 2.009.891,22 kg CO_2. Dakle, u 5 godina uklonilo bi se 10.049.456,12 kg CO_2 iz zraka.

Uz zamjenu autobusa u prvih 5 godina mogu se instalirati sve potrebne punionice vodika koje bi zadovoljile potrebe svih 360 autobusa pogonjena vodikovim gorivnim člancima koji su zamijenile one pogonjene dizelom kao i 76 autobusa pogonjena vodikovim gorivnim člancima koji se zamijenile one pogonjene stlačenim prirodnim plinom. Dakle, potrebno je instalirati punionice vodika da dnevno mogu opskrbljivati, ako je potrebno, svih 436 autobusa. Kako jedna punionica vodika može napuniti 30 autobusa dnevno, a, ako su se već instalirale dvije punionice pri trenutnoj zamjeni 10% autobusa pogonjenih dizelom onima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima, potrebno je još osigurati dovoljno vodika za 376 autobusa. Drugim riječima, do 2025. godine potrebno je instalirati još 13 punionica vodika.

7.5.2. Analiza troškova zamjene 35% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima + potpune instalacija punionica vodika do 2025. godine

U Tablici 22 mogu se vidjeti prosječni godišnji troškovi dok se u Tablici 23 mogu vidjeti ukupni petogodišnji troškovi zamjene 35% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima i potpune instalacija punionica vodika.

Tablica 22. Analiza prosječnih godišnjih troškova zamjene 35% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima i ukupne instalacije punionica vodika

Punionica vodika	
Cijena jedne punionice vodika [26][27]	€1.500.000
Autobusi pogonjeni dizelom	
Cijena rabljenog autobusa (prema prosjeku starosti od 11 godina) [29]	€28.950
Zarada od prodaje autobusa	€654.270
Autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima	
Cijena novih autobusa	€450.000
Troškovi	
Punionica vodika	€3.900.000
Autobusi	€10.170.000
Ukupno	**€14.070.000**
Ukupno uz prodaju starih autobusa	**€13.415.730**

Tablica 23. Analiza ukupnih petogodišnjih troškova zamjene 35% autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima i potpune instalacija punionica vodika

Troškovi	
Punionice vodika	€19.500.000
Autobusi	€50.850.000
Ukupno	**€70.350.000**
Zarada od prodaje autobusa pogonjenih dizelom	€3.271.350
Ukupno uz zaradu od prodaje starih autobusa	**€67.078.650**

7.5.3 Zamjena ostatka autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima

U sljedećih 5 godina, od 2025. do 2030. godine, ostatak autobusa pogonjenih dizelom, njih 65% ili 211 autobusa trebalo bi biti zamijenjeno autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima. Uvođenjem u prosjeku 42,2 autobusa godišnje (42 autobusa četiri godine i 43 autobusa jednu godinu) Grad Zagreb bi u tom razdoblju godišnje dodatno smanjivao zagađenje zraka. Naime, prosječno bi se jednom godišnje zaustavilo stvaranje 3.752.982,73 kg štetnih emisija CO_2. Dakle, kroz period od 5 godina u Gradu Zagrebu bi se iz zraka uklonilo 18.764.913,65 kg CO_2.

7.5.4 Analiza troškova zamjene ostatka autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima

U Tablici 24 mogu se vidjeti prosječni godišnji troškovi dok se u Tablici 25 mogu vidjeti ukupni petogodišnji troškovi zamjene ostatka autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima.

Tablica 24. Analiza prosječnih godišnjih troškova zamjene ostatka autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima

Autobusi pogonjeni dizelom	
Cijena rabljenog autobusa (prema prosjeku starosti od 11 godina) [29]	€28.950
Zarada od prodaje autobusa	€1.221.690
Autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima	
Cijena novih autobusa	€450.000
Troškovi	
Autobusi	€18.990.000
Ukupno	**€18.990.000**
Ukupno uz prodaju starih autobusa	**€17.768.310**

Tablica 25. Analiza ukupnih petogodišnjih troškova zamjene ostatka autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima

Troškovi	
Autobusi	€94.950.000
Ukupno	**€94.950.000**
Zarada od prodaje autobusa pogonjenih dizelom	€6.108.450
Ukupno uz zaradu od prodaje starih autobusa	**€88.841.550**

7.6 Učinak na okoliš i ukupni troškovi u razdoblju 2020.-2030.

Uz ukupno 360 zamjenjenih autobusa kojima je pogonsko gorivo dizel za autobuse pogonjene vodikovim gorivnim člancima, u razdoblju 2020.-2030. godine uvedeno je i 15 punionica vodika, za 360 postojećih autobusa i 76 budućih koji će zamjeniti autobuse pogonjene stlačenim prirodnim plinom.

Što se tiče štetnih emisija CO_2, nakon 2030. godine, kada u Gradu Zagrebu više ne bi prometovao niti jedan autobus pogonjen dizelom, u usporedbi s 2019. godinom, u zrak bi se

godišnje ispuštalo 32.015.965 kg CO_2 manje. Kada bi se pogledali učinci autobusa pogonjenih vodikovim gorivnim člancima koji bi bili uvedeni na samome početku moglo bi se zaključiti da su oni uštedjeli oko 890 t CO_2 u 10 godina u usporedbi s konvencionalnim dizelskim autobusima.

U Tablici 26 mogu se vidjeti ukupni troškovi u razdoblju 2020.-2030.

Tablica 26. Ukupni troškovi zamjene autobusa pogonjenih dizelom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima + troškovi instalacije punionica vodika

Troškovi	
Punionice vodika	€22.500.000
Autobusi	€162.000.000
Ukupno	**€184.500.000**
Zarada od prodaje autobusa pogonjenih dizelom	€10.422.000
Ukupno uz zaradu od prodaje starih autobusa	**€174.078.000**

7.7 Zamjena autobusa pogonjenih stlačenim prirodnim plinom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima u razdoblju od 2030.-2034. godine

Kada bi se do 2030. godine iz Grada Zagreba uklonili svi autobusi pogonjeni dizelom, zamjenivši ih onim koji su pogonjeni vodikovim gorivnim člancima, u Zagrebu bi prometovalo još 76 autobusa koji, iako emitiraju manje CO_2 od konvencionalnih dizelskih autobusa, još uvijek proizvode CO_2 koji šteti okolišu. To su autobusi kojima je pogonsko gorivo stlačeni prirodni plin. Četverogodišnjim planom, u razdoblju od 2030. do 2034. godine, uvođenjem i zamjenom ovakvih autobusa autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima Zagreb bi u potpunosti postao grad koji u autobusnom javnom gradskom prijevozu ne bi emitirao CO_2. Naime, u ove četiri godine prosječno bi se godišnje uštedjelo 1.354.724,51 kg CO_2. Dakle, prema planu bi se u ove četiri godine ukupno spriječila proizvodnja od 5.418.898,04 kg CO_2 koja bi se godišnje emitirala u okoliš.

7.7.1 Analiza troškova zamjene autobusa pogonjenih stlačenim prirodnim plinom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima u razdoblju od 2030.-2034. godine

U Tablici 27 mogu se vidjeti prosječni godišnji troškovi dok se u Tablici 28 mogu vidjeti ukupni četverogodišnji troškovi zamjene autobusa pogonjenih stlačenim prirodnim plinom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima.

Tablica 27. Analiza prosječnih godišnjih troškova zamjene autobusa pogonjenih stlačenim prirodnim plinom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima

Autobusi pogonjeni stlačenim prirodnim plinom	
Cijena rabljenog autobusa (prema prosjeku starosti od 7 godina) [30]	€38.000
Zarada od prodaje autobusa	€722.000
Autobusi na pogon vodikovim gorivnim člancima	
Cijena novih autobusa	€450.000
Troškovi	
Autobusi	€8.550.000
Ukupno	**€8.550.000**
Ukupno uz prodaju starih autobusa	**€7.828.000**

Tablica 28. Analiza ukupnih četverogodišnjih troškova zamjene autobusa pogonjenih stlačenim prirodnim plinom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima

Troškovi	
Autobusi	€34.200.000
Ukupno	**€34.200.000**
Zarada od prodaje autobusa pogonjenih prirodnim plinom	€2.888.000
Ukupno uz zaradu od prodaje starih autobusa	**€31.312.000**

7.8 Ukupan utjecaj na okoliš i troškovi u razdoblju 2020.-2034. godine

U ovom 14-ogodišnjem projektu sa cesta Grada Zagreba maknulo bi se ukupno 436 autobusa koji u okoliš emitiraju CO_2. Od tih 436 autobusa njih 360 pogonjeno je dizelom dok je 76 pogonjeno stlačenim prirodnim plinom. Nakon 2030. godine zamijenili bi se svi autobusi pogonjeni dizelom i nakon toga se ukupno godišnje zaustavilo 32.015.965 kg emisije CO_2. Dodavši na to sljedeće 4 godine u kojima su se zamijenili autobusi pogonjeni stlačenim prirodnim plinom pri čemu se nakon njihove potpune zamjene godišnje zaustavilo 5.418.898 kg emisije CO_2, može se vidjeti da bi se u 2035. godini, u odnosu na 2019., uštedjelo čak ukupno 37.434.863 kg štetne emisije CO_2.

Ukupni troškovi iz razdoblja 2020.-2034. godine mogu se vidjeti u Tablici 29.

Tablica 29. Ukupni troškovi u razdoblju 2020.-2034.

Troškovi	
Punionice vodika	€22.500.000
Autobusi	€196.200.000
Ukupno	**€218.700.000**
Zarada od prodaje autobusa pogonjenih dizelom	€10.422.000
Zarada od prodaje autobua pogonjenih stlačenim prirodnim plinom	€2.888.000
Ukupno uz zaradu od prodaje starih autobusa	**€205.390.000**

8. ZAKLJUČAK

Kako javni gradski prijevoz, kao dio prometne industrije, pridonosi onečišćenju zraka zbog korištenja autobusa većinski pogonjenim dizelom, neke države članice EU, njih čak sedam, odlučile su kao dio svog plana smanjenja emisije CO_2 uvesti autobuse pogonjene vodikovim gorivnim člancima. Time su učinile veliki korak prema zelenijoj budućnosti.

Provođenjem analize zamjene tradicionalnih autobusa pogonjenim dizelom i stlačenim prirodnim plinom autobusima pogonjenim vodikovim gorivnim člancima u Gradu Zagrebu može se zaključiti da je, uz sufinanciranje iz fondova EU, projekt ostvariv. Što se tiče učinka na emisije CO_2, nakon cjelokupne zamjene ukupno 436 autobusa, prema 2019. godini, godišnje će se uštedjeti čak 37.434.863 kg emisije CO_2. Također bi se ovakvim projektom, uz bolju edukaciju građana o važnosti smanjenja štetnih emisija stakleničkih plinova, moglo potaknuti što veći broj ljudi da za odlazak na posao koristi gradski prijevoz. Time bi se dodatno smanjila štetna emisija jer bi se uzročno tome smanjio i broj automobila na cestama.

LITERATURA

[1] https://ec.europa.eu/clima/change/causes_hr (pristup 7. srpnja 2020.)

[2] Ankica Kovač, predavanja iz kolegija Nove tehnologije u energetici, Vodik i Gorivni članci, 2019./2020., FSB, Zagreb

[3] https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions (pristup 7. srpnja 2020.)

[4] https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-12 (pristup 7. srpnja 2020.)

[5] Ankica Đukić Proizvodnja vodika elektrolizom vode pomoću Sunčeve energije i fotonaponskoga modula, FSB, Zagreb, 2013.

[6] http://www.fuelcellstock.com/cell-types/pem (pristup 7. srpnja 2020.)

[7] Nicolas Pocard, Director Marketing, Ballard Powered Systems, The other electric bus, https://cutaactu.ca/en/news-media/other-electric-bus (pristup 12. srpnja 2020.)

[8] https://www.fuelcellbuses.eu/ (pristup 10. srpnja 2020.)

[9] https://www.youtube.com/watch?v=8HxWRWOvpyQ (pristup 12. srpnja 2020.)

[10] https://hydrogeneurope.eu/node/453 (pristup 19. srpnja 2020.)

[11] https://www.newflyer.com/site-content/uploads/2019/03/Xcelsior-CHARGE-H2-web-1.pdf (pristup 19. srpnja 2020.)

[12] http://ieahydrogen.org/pdfs/Case-Studies/bavarian_proj.aspx (pristup 19. srpnja 2020.)

[13] https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/selection.pdf (pristup 10. srpnja)

[14] Leigh Collins, A wake up call on green hydrogen: the amount of wind and solar needed is immense, ožujak 2020., https://www.rechargenews.com/transition/a-wake-up-call-on-green-hydrogen-the-amount-of-wind-and-solar-needed-is-immense/2-1-776481 (pristup 19. srpnja 2020.)

[15] https://www.globalpetrolprices.com/diesel_prices/Europe/ (pristup 19. srpnja 2020.)

[16] https://www.greencarcongress.com/2020/06/20200604-solaris.html (pristup 19. srpnja 2020)

[17] Gradski ured za strategijsko planiranje i razvoj Grada Zagreba, Razvojna strategija Grada Zagreba za razdoblje do 2020. godine, kolovoz 2017.

[18] Ankica Džono-Boban, Više kretanja-manje emisije CO_2 https://www.zzjzdnz.hr/hr/hr/zdravlje/okolis-i-zdravlje/362 (pristup 22. kolovoza 2020.)

[19] https://www.zet.hr/ (pristup 22. kolovoza 2020.)

[20] ZET, Pregled emisija CO_2 prema pogonskom gorivu za 2019. godinu - excel

[21] https://www.zagreb.hr/punionica-prirodnog-plina-za-autobuse-zeta/60098 (pristup 23. kolovoza 2020.)

[22] https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator (pristup 23. kolovoza 2020.)

[23] Could global CO_2 levels be reduced by planting trees?, listopad 2018. https://www.co2meter.com/blogs/news/could-global-co2-levels-be-reduced-by-planting-trees (pristup 23. kolovoza 2020.)

[24] https://h2stationmaps.com/costs-and-financing (pristup 23. kolovoza 2020.)

[25] Krunoslav Ćosić, Otvorena je prva hrvatska punionica vodika, svibanj 2019. https://autogaraza.hr/novosti/otvorena-je-prva-hrvatska-punionica-vodika/ (pristup 23. kolovoza 2020.)

[26] https://www.wardsauto.com/technology/costs-check-growth-fuel-cell-infrastructure (pristup 16. rujna 2020.)

[27] https://cafcp.org/sites/default/files/100-Bus_8page_v4a_SINGLE_PAGE.2019-08-06.pdf (pristup 16. rujna 2020.)

[28] https://www.waterstofnet.eu/_asset/_public/H2Benelux/Press-release_Launch-of-H2Benelux-project_ENG_28-09-2018.pdf (pristup 23. kolovoza 2020.)

[29] https://autoline.info/ (pristup 24. Kolovoza 2020.)

[30] https://www.alibaba.com/showroom/used-cng-bus.html (pristup 24. kolvoza 2020.)

PRILOZI

I. CD-R disc