

# Utjecaj primjene vodika kao alternativnog goriva na održivi razvoj zračnog prometa

---

Ćurić, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*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:119:455586>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## ZAVRŠNI RAD

**UTJECAJ PRIMJENE VODIKA KAO ALTERNATIVNOG GORIVA NA  
ODRŽIVI RAZVOJ ZRAČNOG PROMETA**

**THE IMPACT OF USING HYDROGEN AS AN ALTERNATIVE FUEL ON  
THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF AIR TRAFFIC**

Mentor: doc. dr. sc. Igor Štimac

Student: Filip Ćurić

JMBAG: 0135258293

Zagreb, rujan 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**  
**ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, 5. svibnja 2023.

Zavod: **Zavod za zračni promet**  
Predmet: **Osnove aerodroma**

**ZAVRŠNI ZADATAK br. 7177**

Pristupnik: **Filip Ćurić (0135258293)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Utjecaj primjene vodika kao alternativnog goriva na održivi razvoj zračnog prometa**

Opis zadatka:

U prvome dijelu rada potrebno je analizirati i opisati mogućnosti primjene obnovljivih izvora energije u zrakoplovstvu. Nadalje potrebno je opisati regulativni okvir za implementaciju vodika te navesti na temelju dosadašnjeg istraživanja i dostupne literature koje su prednosti i nedostaci za implementaciju istoga u zrakoplovstvu. U nastavku je potrebno prikazati primjere dobre prakse implantacije vodika na jednoj zračnoj luci, na jednom tipu zrakoplova i jednoj opremi za prihvat i otpremu zrakoplova. Na kraju rada potrebno je na temelju prethodno navedenoga izraditi zaključak.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

doc. dr. sc. Igor Štimac

## SAŽETAK

Zbog sve većeg zagađenja okoliša i uništavanja ravnoteže prirodnog ekosustava, industrija pa tako i zrakoplovstvo se okreće novim ekološki prihvatljivijim izvorima energije koji će ponajprije smanjiti emisiju stakleničkih plinova, donijeti niz drugih prednosti i poboljšanja u odnosu na fosilna goriva koja se većinski koriste u današnjem zrakoplovstvu. Promjene će biti zahtjevne i izazovne. Vodik kao jedno od budućih rješenja, ima nevjerojatna svojstva zbog kojih može biti rješenje za smanjenje emisija, te dekarbonizaciju čime bi se mogla postići nulta razina emisija ugljikova dioksida u zračnom prometu. Smatra se jako poželjnim jer se može proizvoditi i upotrebljavati bez stvaranja ugljičnog dioksida, a uz to je prisutan u vodi u velikim količinama. Motori pogonjeni na vodik znatno su tiši od današnjih i emitiraju manje ostalih ispušnih plinova. S druge strane za primjenu vodika potrebna je posebna aerodromska i transportna infrastruktura. Postoje također velik broj izazova i prepreka vezanih uz proizvodnju vodika kao i uz samu implementaciju vodika koji su navedeni i objašnjeni u radu.

KLJUČNE RIJEČI: vodik; dekarbonizacija; alternativni izvori energije; razvoj; implementacija vodika

## SUMMARY

Due to the increasing pollution of the environment and the destruction of the balance of the natural ecosystem, the industry, including aviation, is turning to new, more environmentally friendly energy sources that will primarily reduce the emission of greenhouse gases, bring a number of other advantages and improvements compared to the fossil fuels that are mostly used in today's aviation. Changes will be demanding and challenging. Hydrogen, as one of the future solutions, has incredible properties that make it a solution for reducing emissions and decarbonization, which could completely eliminate carbon oxide from aviation. It is considered very desirable because it can be produced and used without the production of carbon dioxide, and it is also present in water in large quantities. Engines powered by hydrogen are significantly quieter than today's and emit less other exhaust gases. On the other hand, the use of hydrogen requires a special airport and transport infrastructure. There are also a large number of challenges and obstacles related to the production of hydrogen as well as the implementation of hydrogen itself, which are listed and explained in the paper.

KEYWORDS: hydrogen; decarbonization; alternative sources of energy; development; implementation of hydrogen

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 2. OSNOVNE ZNAČAJKE VODIKA KAO ALTERNATIVNOG GORIVA U ZRAČNOM PROMETU .....                              | 3  |
| 2.1. Svojstva vodika .....   | 3  |
| 2.2. Proizvodnja vodika .....  | 6  |
| 2.3. Vrste vodika .....  | 7  |
| 2.3.1. Sivi vodik.....   | 7  |
| 2.3.2. Plavi vodik.....  | 8  |
| 2.3.3. Zeleni vodik .....  | 8  |
| 2.4. Pohrana i prijevoz vodika .....   | 8  |
| 2.5. Korištenje i sigurnost opskrbe vodika .....   | 9  |
| 2.6. Primjena drugih alternativnih izvora energije u zračnom prometu.....                                | 10 |
| 2.6.1. Električna energija.....  | 11 |
| 2.6.2. Biogoriva.....  | 12 |
| 2.6.3. Solarna energija.....   | 14 |
| 2.6.4. Vjetroenergija.....   | 16 |
| 2.6.5. Nuklearna energija .....  | 17 |
| 3. POVIJESNI RAZVOJ VODIKA U ZRAČNOM PROMETU .....   | 18 |
| 3.1. Prvi zrakoplovi na vodik.....   | 18 |
| 3.1.1. Zrakoplov Martin B-57Canberra.....  | 18 |
| 3.1.2. Zrakoplov CL-400 Suntan.....  | 20 |
| 3.1.3. Zrakoplov Tupoljev 155 .....  | 20 |
| 3.1.4. Zrakoplov Diamond HK36 Super Dimona.....  | 21 |
| 3.1.5. Zrakoplov Antares DLR H2.....   | 21 |
| 3.1.6. Zrakoplov DLR HY4 .....   | 23 |
| 3.2. Primjena vodika u današnje vrijeme .....  | 24 |
| 4. REGULATORNI OKVIR ZA IMPLEMENTACIJU VODIKA U ZRAKOPLOVSTVU.....                                       | 26 |
| 4.1. Međunarodna razina .....  | 26 |
| 4.1.1. CORSIA – Program za neutralizaciju i smanjenje emisija ugljika za međunarodno zrakoplovstvo ..... | 26 |
| 4.1.2. ICAO Izvješće o okolišu 2022.....   | 27 |

|   |    |
|---|----|
| 4.1.3. Odluka A39-2: Konsolidirana izjava o kontinuiranoj politici i praksi ICAO-a za zaštitu okoliša ..... | 27 |
| 4.1.4. Agenda 2030 – Održivi razvoj.....  | 27 |
| 4.2. Europska razina .....  | 28 |
| 4.2.1. Europski zeleni plan.....  | 28 |
| 4.2.2. Izvješće o strategiji zrakoplovstva za Europu.....   | 28 |
| 4.2.3. Europska vodikova strategija .....   | 28 |
| 4.2.4. Europski plan za obnovu .....  | 29 |
| 4.2.5. Europska inicijativa za čisto zrakoplovstvo .....  | 29 |
| 4.2.6. Čisto nebo.....  | 29 |
| 4.3. Nacionalna razina .....  | 30 |
| 4.3.1. Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu.....           | 30 |
| 4.3.2. Nacionalna razvojna strategija Republike Hrvatske do 2030. godine.....                               | 31 |
| 4.3.3. Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine .....   | 31 |
| 4.3.4. Nacionalni plan oporavka i otpornosti 2021. – 2026.....  | 32 |
| 5. PREDNOSTI I NEDOSTACI PRIMJENE VODIKA U ZRAKOPLOVSTVU .....  | 33 |
| 5.1. Prednosti primjene vodika u zračnom prometu .....  | 33 |
| 5.1.1. Nulta emisija CO <sub>2</sub> .....  | 33 |
| 5.1.2. Niske emisije štetnih tvari .....  | 34 |
| 5.1.3. Visoka energetska učinkovitost po masi .....   | 34 |
| 5.1.4. Prihvatljiva ekološka proizvodnja.....   | 34 |
| 5.1.5. Smanjenje buke .....   | 35 |
| 5.1.6. Sigurnost.....   | 35 |
| 5.2. Nedostaci i izazovi kod primjene vodika u zračnom prometu .....  | 35 |
| 5.2.1. Modifikacije zrakoplova .....  | 35 |
| 5.2.2. Infrastrukturni zahtjevi i prilagodbe zračnih luka .....   | 40 |
| 6. PRIMJERI PRIMJENE VODIKA KOD ZRAKOPLOVA I ZRAČNIH LUKA .....   | 43 |
| 6.1 Primjeri zračnih luka .....   | 43 |
| 6.1.1. Zračne luke Rotterdam i Hamburg .....  | 43 |
| 6.1.2. Zračne luke Le Bourget, Orly i Charles De Gaulle – Pariz, Francuska.....                             | 44 |
| 6.1.3. Zračna luka Teessied, Ujedinjeno kraljevstvo .....   | 45 |

|   |    |
|---|----|
| 6.1.4. Zračna luka Glasgow.....   | 46 |
| 6.1.5. Zračna luka Brisbane .....   | 47 |
| 6.1.6. Zračna luka Milano Malpensa, Italija .....                           | 48 |
| 6.1.7. Međunarodna zračna luka Edmonton, Kanada.....                        | 49 |
| 6.1.8 Međunarodna zračna luka Los Angeles, Sjedinjene Američke Države ..... | 50 |
| 6.1.9. Zračna luka Manchester .....   | 51 |
| 6.2. Primjeri zrakoplova.....   | 51 |
| 6.2.1. Airbus ZEROe projekt .....   | 52 |
| 6.2.2. Boeing bespilotna teretna letjelica - CAV .....                      | 52 |
| 6.2.3. E – Fan X projekt.....   | 53 |
| 6.2.4. Zrakoplov De Havilland Dash 8-300, Universal Hydrogen .....          | 54 |
| 6.2.5. Prototip zrakoplova ZA600, ZeroAvia.....                             | 54 |
| 7. ZAKLJUČAK.....   | 56 |
| POPIS LITERATURE.....   | 58 |
| POPIS KRATICA .....   | 66 |
| POPIS SLIKA .....   | 67 |
| POPIS TABLICA.....  | 69 |

# 1. UVOD

U današnjem suvremenom svijetu sve se više prepoznaju izazovi vezani uz klimatske promjene i onečišćenje ekosustava. Potraga za održivim rješenjima postala je ključna komponenta razvoja u različitim područjima industrije. Zračni promet bez obzira na globalnu povezanost i mobilnost suočava se sa svojim negativnim posljedicama na okoliš. Emisije stakleničkih plinova i drugih štetnih tvari dobivenih iz zrakoplovnih motora postaju sve veća pažnja međunarodnih organizacija i vlasti.

S ciljem očuvanja okoliša traga se za održivijim budućim modelima zračnog prometa. Istražuju se i razvijaju alternativna goriva koja bi mogla rapidno smanjiti emisije štetnih plinova kao i negativne ekološke učinke zračne industrije. Jedno od perspektivnijih rješenja koje se ističe u tom kontekstu je tehnologija vodika kao alternativnog pogonskog sustava.

Svrha ovog završnog rada je prikazati potencijal i prednosti ove vrste tehnologije ali i s druge strane velik broj prepreka i izazova koje je potrebno savladati kako bi se uspješno provela implementacija vodika u zrakoplovstvu. Također, ovaj rad donosi prikaz kako se primjena vodika može uklopiti u ciljeve održivog razvoja zračnog prometa i doprinijeti smanjenju emisija ugljikova dioksida i stvaranju ekološki prihvatljivije i održivije budućnosti zrakoplovne industrije koja je vrlo bitna za globalnu mobilnost.

Završni rad podijeljen je u sedam cjelina:

1. Uvod
2. Osnovne značajke vodika kao alternativnog goriva u zračnom prometu
3. Povijesni razvoj vodika u zračnom prometu
4. Regulatorni okvir za implementaciju vodika u zrakoplovstvu
5. Prednosti i nedostaci primjene vodika u zrakoplovstvu
6. Primjeri primjene vodika kod zrakoplova i zračnih luka
7. Zaključak.

U prvom poglavlju objašnjena je potreba za prelaskom na alternativne izvore energije, a donosi i kratki osvrt na svako poglavlje rada.

Drugo poglavlje sadrži opis osnovnih svojstava vodika kao i prikaz njegovog kompletnog vrijednosnog lanca od njegove proizvodnje, pohrane, pa sve do njegovog korištenja. Drugi dio sadrži i pregled drugih alternativnih izvora energije velikog potencijala koji se također istražuju i primjenjuju u zrakoplovstvu.

Treće poglavlje obuhvaća povijesni razvoj tehnologije vodika koji seže neočekivano daleko u prošlost, a donosi i prikaz povijesnih pokušaja razvijanja zrakoplova pogonjenih na vodik kao i njihov razvoj do kojeg su došli.



Četvrto poglavlje donosi pregled dokumenata na međunarodnoj, europskoj i nacionalnoj razini koji su od velikog značaja za implementaciju vodika na svim razinama.

U petom poglavlju prikazan je puni potencijal vodika kao i velik broj prednosti koje ta tehnologija donosi. S druge strane ovo poglavlje obuhvaća opis i prikaz svih zahtjeva i prepreka koje je potrebno savladati kako bi se omogućila primjena vodika u zrakoplovstvu.

Primjeri implementacije tehnologije vodika kod zračnih luka i zrakoplova nalaze se u šestom poglavlju.

Sedmo poglavlje sadrži zaključne misli i završna razmatranja o temi koja su donesena na temelju ovog rada.

## 2. OSNOVNE ZNAČAJKE VODIKA KAO ALTERNATIVNOG GORIVA U ZRAČNOM PROMETU

U posljednja tri desetljeća emisije stakleničkih plinova u međunarodnom zrakoplovstvu drastično su se povećale. Iako zrakoplovstvo zauzima mali udio svjetskih emisija stakleničkih plinova, ono predstavlja najbrže rastući izvor emisija ugljikova dioksida (*eng. Carbon dioxide – CO<sub>2</sub>*) zbog čega se traže neka nova rješenja koja će smanjiti njihov utjecaj na globalno zatopljenje koje doprinosi klimatskim promjenama. Smanjivanje utjecaja zrakoplovstva na klimu postaje prioritet, te je zbog toga potrebno ograničiti ovisnost o fosilnim gorivima i pronaći nove alternativne izvore energije, gdje se kao jedan od glavnih kandidata nameće vodik.

Vodik privlači sve veću pozornost u Europi i u svijetu kao jedan od budućih ekološki prihvatljivijih izvora energije. Može se koristiti kao sirovina, gorivo i nositelj energije, a uz to ima široku primjenu u industriji, energetici i transportu. Važno je naglasiti da ne emitira ugljikov dioksid i da prilikom korištenja ne zagađuje zrak. Pa zbog toga se smatra rješenjem za dekarbonizaciju, kako u zrakoplovstvu tako i u ostalim industrijskim i gospodarskim sektorima, stoga je važan čimbenik u provođenju politike klimatske neutralnosti [1].

### 2.1. Svojstva vodika

Vodik je najjednostavniji i najzastupljeniji element u svemiru, ali po težini zauzima samo 0,14% zemljine kore. Pojavljuje se u velikim količinama u vodi i atmosferi, a prisutan je i u životinjskim i biljnim tkivima kao i u nafti [2]. Vodik je plin 14 puta lakši od zraka, bez okusa, boje i mirisa. U standardnim uvjetima se pojavljuje kao plin, dok pri niskoj temperaturi postaje tekućina. Gori skoro bezbojnim plavkastim plamenom, ako se usporedi s drugim konvencionalnim gorivima, po jedinici mase vodik daje više energije. Glavna razlika tekućeg vodika u odnosu na plinoviti vodik je njegova vrlo niska temperatura i tekuća faza. Također, plamen vodika drugačiji je od plamena ugljikovodičnih goriva, što se vidi po produktima izgaranja, ugljikovodici sadrže CO<sub>2</sub>, ugljikov oksid i čađu, dok ih vodik ne proizvodi. U tablici 1 prikazane su glavne značajke vodika u usporedbi s osnovnim značajkama benzina i prirodnog plina. Može se primijetiti da su opasnosti vezane uz vodik slične onima kao i kod prirodnog plina i benzina, tako da se može zaključiti da vodik nije ništa opasniji od ostalih neobnovljivih izvora energije ako se s njime postupa na propisan i siguran način [3].

**Tablica 1.** Usporedba značajki vodika sa značajkama benzina i prirodnoga plina

|                      | Vodik         | Prirodni plin    | Benzin          |
|----------------------|---------------|------------------|-----------------|
| Boja                 | Ne            | Ne               | Da              |
| Toksičnost           | Ne            | Srednje toksičan | Visoko toksičan |
| Miris                | Bez mirisa    | Merkaptan        | Da              |
| Uzgon                | 14x lakši     | 2x lakši         | 3,75x teži      |
| Energija po masi     | 2,8x > benzin | -1,2x > benzin   | 43MJ/kg         |
| Energija po volumenu | 4x < benzin   | 1,5 < benzin     | 32 MJ/L         |

Izvor: [3]

U standardnim uvjetima atmosfere vodik se pojavljuje u obliku plina dok je za primjenu u zrakoplovstvu pogodniji tekući vodik, jer plin ima vrlo nisku volumnu gustoću energije, zbog čega tekući vodik ima puno veći potencijal u komercijalnom zrakoplovstvu. Da bi se mogao pohraniti vodik kao tekućina, potrebno ga je ohladiti na  $-253^{\circ}\text{C}$ . Uz to je potrebno zbog niske točke vrenja koristiti posebnu izolaciju visokih performansi da ne bi došlo do isparavanja. Ako dođe do isparavanja jedne litre tekućeg vodika, na sobnoj temperaturi ona će zauzeti prostor od 845 litara. Sukladno tome, potrebno je skladišne prostore i spremnike tekućeg vodika opremiti sa sigurnosnim ventilima i sensorima tlaka kako ne bi došlo do nastanka prekomjernog tlaka, a posljedično i kvara na spremniku za pohranu vodika. Također, ako dođe do isparavanja može doći do požara jer je plin lako zapaljiv, dok prilikom isparavanja tekućeg vodika u kontaktu s kožom može doći do nastanka ozeblina [4].

Energija se iz vodika može dobiti bez ispuštanja ikakvih emisija ugljika za razliku od kerozina. Osim toga, energija vodika po masi je tri puta veća nego kod kerozina, što je velika prednost zbog granica opterećenja zrakoplova, dok energija po volumenu predstavlja samo jednu četvrtinu mase kerozina zbog čega vodik zahtjeva veće prostorne skladišne zahtjeve. Vodik ima velik broj drugih svojstva koja se razlikuju od kerozina koja su prikazana u tablici 2 [4].

**Tablica 2.** Usporedba karakteristika kerozina (Jet a-1) i tekućeg vodika

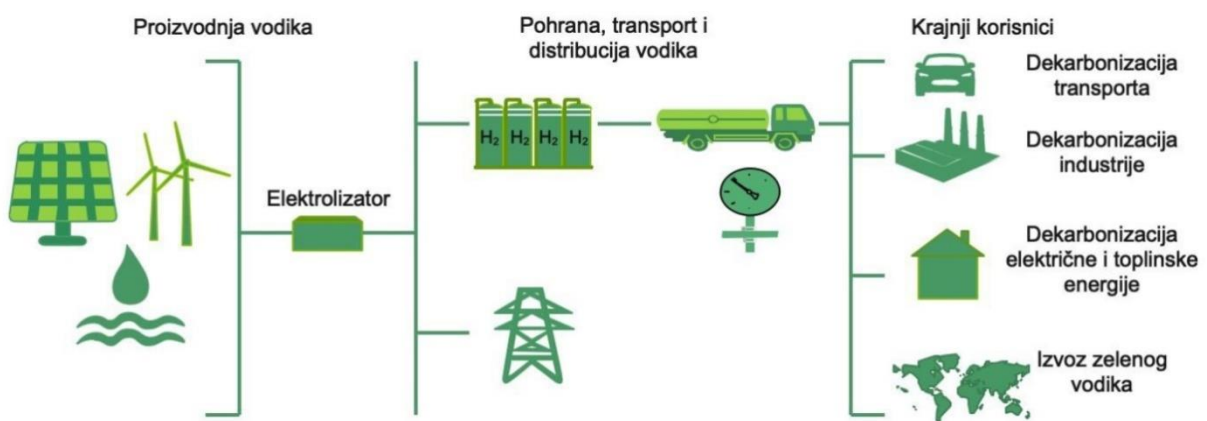
|                                  | Jet A-1   | Kriogeni vodik, LH2 | Posljedice  |
|----------------------------------|-----------|---------------------|---|
| Vrelište ( $^{\circ}\text{C}$ )  | 167 – 266 | -253                | ozeblina, isparavanje vodika, krhkost materijala                                    |
| Granica zapaljivosti (%)         | 0,6 – 4,7 | 4 - 75              | velika vjerojatnost požara vodika, ali je za pokretanje potrebna veća koncentracija |
| Minimalna energija paljenja (mJ) | 0,25      | 0,02                | veća vjerojatnost požara vodika uzorkovanog sa slabim iskrama                       |
| Brzina gorenja                   | 18        | 265 – 325           | požar uzrokovan vodikom bi brže   |

|                                 |           |   |  |
|---------------------------------|-----------|---|--|
| (cm/s)                          |           |   | izgorio nego onaj uzrokovan kerozinom  |
| Potisak                         | -         | 14 puta lakši od zraka, diže se na 20 m/s | vodik u plinovitom stanju se brzo raspršuje  |
| Temperatura samozapaljenja (°C) | 210       | 585                                       | teže se zapali s čistom toplinom   |
| Frakcija zračenja požara        | 30 – 40 % | 10 – 20 %                                 | požari uzrokovani vodikom su manje razorni jer zrače manje topline, ali je predstavlja izazov zbog nevidljivog plamena |

Izvor: [4]

Europska unija, Hrvatska, kao i neke druge države diljem svijeta, razvile su strategije za razvoj vodika. Sve više se ulaže u razvoj ove tehnologije kako u zrakoplovstvu tako i u ostalim industrijama koje su prepoznale potencijal vodika. Iako su potrebe zrakoplovne industrije prevelike da bi se gospodarstvo zasnivalo na vodikom, sadašnja i buduća istraživanja i ulaganja bi trebala riješiti taj problem. S tim ciljem da se uspostavi gospodarstvo zasnovano na vodikom, potrebno je osigurati razvoj i usklađenost tri glavna elementa; proizvodnju, skladištenje i potrošnju (slika 1) [5].

Prema istraživanju FlyZero, previđa se da je potrebno 70 milijuna tona tekućeg vodika za potrebe zračnog prometa na svjetskoj razini [4].

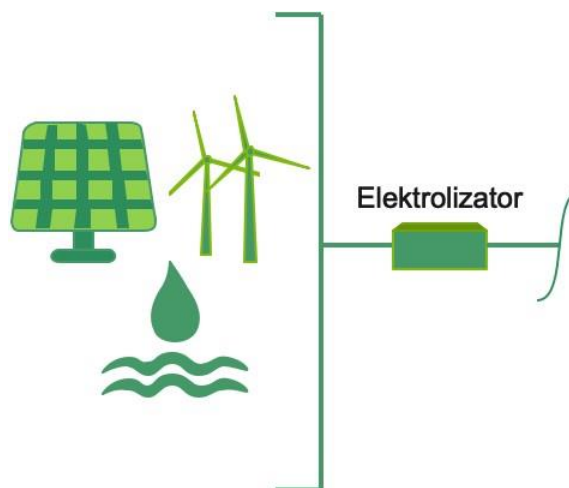


Slika 1. Prikaz sheme vodikovog lanca vrijednosti od proizvodnje do korištenja, [15]

## 2.2. Proizvodnja vodika

Vodik se u prirodi ne može naći u elementarnom obliku jer je vezan za druge kemijske spojeve. Zbog toga ga je prilikom proizvodnje potrebno izdvojiti iz spoja u kojem se nalazi, što se postiže različitim metodama koje su navedene u daljnjem tekstu [5].

Postoje tri različite metode proizvodnje vodika prema kojima se vodik dijeli na sivi, plavi i zeleni. Trenutno najčešća metoda proizvodnje je reformiranje parom metana (*eng. Steam methane reforming – SMR*) koja koristi metan kao sirovinu iz prirodnog plina, čime se stvaraju emisije ugljikova dioksida kao nusproizvod zbog odvajanja ugljika od vodika u molekuli metana. Ako se taj ugljikov dioksid ispusti u atmosferu životni ciklus vodika je daleko od razine nula ugljika. Ovom vrstom proizvodnje dobiva se sivi vodik koji ne predstavlja rješenje za dekarbonizaciju. Ako se otpadni ugljikov vodik pravilno uskladišti tako da se ne ispušta u atmosferu, nastaje plavi vodik, on se također oslanja na proizvodnju iz sirovina. Nadalje, zeleni vodik nastaje elektrolizom vode, za koju se koristi električna energija za razdvajanje vode na glavne elemente: vodik i kisik. Ako se ta električna energija proizvodi bez ugljika, onda je životni ciklus vodika također bez ugljika. Drugim riječima, zrakoplovstvo bi trebalo koristiti zeleni vodik za čiju bi se proizvodnju trebala koristiti električna energija nastala iz obnovljivih izvora energije [4]. Slika 2 prikazuje lanac proizvodnje zelenog vodika iz obnovljivih izvora energije.



Slika 2. Proizvodnja zelenog vodika, [5]

Primarni cilj je postići proizvodnju putem drugih obnovljivih izvora energije (OIE) koristeći elektroenergetsku mrežu, a ne samo na mjestu proizvodnje električne struje iz obnovljivih izvora energije. Potrebno je koristiti obje tehnologije proizvodnje vodika, čime bi se razvoj proizvodnje odvijao sukladno s razvojem novih naprednijih tehnologija za proizvodnju vodika, mogućnostima transporta vodika kroz transportne sustave, te

mogućnostima elektroenergetske mreže koja prenosi električnu energiju do mjesta proizvodnje [5].

Buduće cijene vodika varirat će ovisno o metodi proizvodnje. Prema EU strategiji za vodik, trenutna cijena vodika koji je proizveden iz neobnovljivih izvora energije (sivog vodika) je oko 1,5 EUR, ne gledajući cijenu otpuštenog CO<sub>2</sub> u atmosferu, dok je cijena plavog vodika 2 EUR. Cijena zelenog vodika dobivenog iz elektrolize vode je oko 2,5-5,5 EUR po kilogramu. Prema predviđanjima smatra se da bi cijene električne energije dobivene iz OIE trebale padati narednih godina kao i cijene elektrolizatora, zbog čega se procjenjuje da bi do 2030. godine zeleni vodik trebao biti ravnopravan s vodikom proizvedenim iz fosilnih goriva [5].

### 2.3. Vrste vodika

Osnovna podjela vodika bazira se na bojama vodika, odnosno prema njihovom načinu proizvodnje. Tako postoji; zeleni, plavi, sivi i tirkizni vodik (slika 2). Također, pojedine literature navode da uz te boje postoje i neke druge koje se ne mogu u potpunosti definirati, pa tako imamo još i žuti, smeđi pa čak bijeli, te ljubičasti vodik [3].



Slika 3. Podjela vodika po bojama, [6]

#### 2.3.1. Sivi vodik

Sivi vodik je vrsta vodika čija se proizvodnja temelji na fosilnim gorivima. Postoji crni vodik proizveden iz rasplinjavanja ugljena i crni proizveden procesom iz prirodnog plina, točnije metana, a naziva se reformiranje parom, to je jedna od ako ne i najjeftinija metoda za dobivanje industrijskog vodika. Negativna posljedica ovoga procesa je ispuštanje velikih količina CO<sub>2</sub> i ostalih stakleničkih plinova u atmosferu. Zbog toga ove vrste vodika se ne smatraju pogodnim za postizanjem klimatske neutralnosti [3].

### 2.3.2. Plavi vodik

Plavi vodik sličan je sivom vodikom zbog istog načina proizvodnje iz fosilnih goriva. To podrazumijeva podjelu prirodnog plina na CO<sub>2</sub> i vodik, a nakon toga zadržavanje i skladištenje ugljikova dioksida što ima pozitivan učinak, ali izaziva dodatne troškove. Također, ovim procesom događa se otpuštanje metana u atmosferu, koji je izrazito štetan za okoliš, te predstavlja puno većeg neprijatelja za klimatske promjene u odnosu na ugljikov dioksid. Plavi vodik ima jako veliki potencijali s obzirom na cijenu i količinu proizvoda iz kojih se dobiva, ali je potrebno izvršiti veliki broj istraživanja i proučavanja za razvoj novih tehnologija skladištenja štetnih produkata koji nastaju njegovom proizvodnjom [3].

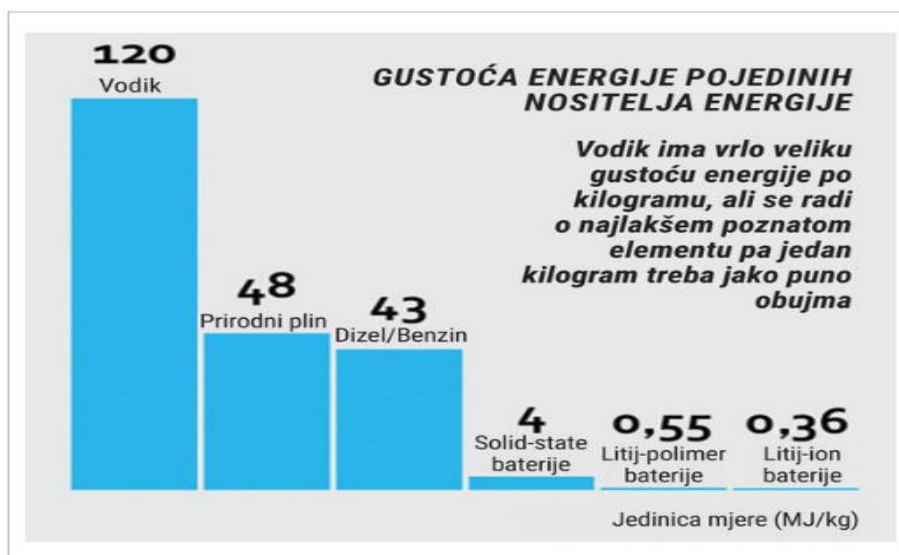
### 2.3.3. Zeleni vodik

Zeleni vodik se naziva i obnovljivi vodik jer se u njegovoj proizvodnji ne koriste fosilna goriva, čime se ne emitiraju štetni plinovi u atmosferu. Zbog toga se smatra pogodnim za postizanje cilja nulte emisije do 2050. godine. On se proizvodi elektrolizom vode, čime se iz vode izvlači vodik i kisik korištenjem električne energije koja je dobivena iz različitih obnovljivih izvora energije. Trenutno se zeleni vodik proizvodi u neznatnim količinama, ali se predviđa da će njegova proizvodnja rasti kako će padati cijena obnovljivih izvora energije [3].

## 2.4. Pohrana i prijevoz vodika

Pohrana vodika je puno zahtjevniji i složeniji proces od pohrane fosilnih goriva, zbog njegove niske gustoće, zbog koje je potrebno skladištiti i prevesti veće količine vodika za istu količinu energije. Sukladno tome, koriste se različite metode pomoću kojih se smanjuje volumen vodika tijekom transporta. Neke od metoda su; kompresija, ukapljivanje ili pretvorba u druge tvari, kao npr. amonijak ili metan, čija je svrha zapravo povećati gustoću energije po volumenu. Prvotno je pohrana vodika zamišljena u plinovitom stanju, dok je dugoročno zbog veće potražnje zamišljena u tekućem stanju [3].

Kao što je i navedeno prethodno u radu, vodik je najlakši poznati element zbog čega je za prijenos jednog kilograma vodika potrebno jako puno volumena (slika 4). Iz tog razloga je potrebno koristiti različite metode da se dobijem što veća masa u što manje volumena. Upravo zato tekući vodik ima najveći potencijali za primjenu u zrakoplovstvu jer ima najveću masu, a najmanji volumen.



Slika 4. Prikaz gustoće energije različitih nositelja energije, [7]

Prema vrsti pohrane vodika, odabiru se različiti načini njegova transporta. Najčešći način je prijevoz stlačenog vodika u spremnicima koji se prevoze kamionima ili prikolicama putem različitih prometnih grana. Ovaj način transporta isplativ je na kraće udaljenosti i ako se radi o malim količinama. Za prijevoz na većim udaljenostima vodik se najčešće prevozi u tekućem obliku. Daljnje povećanje količine i volumena vodika iziskuje novi i isplativiji način transporta, a to je putem cjevovoda, koji iziskuje puno veća ulaganja koja predstavljaju jedan od izazova u implementaciji vodika. Moguće je osim gradnje novih cjevovoda koristiti i već postojeće plinske cjevovode, tako da se umješava vodik u prirodni plin za vrijeme transporta, a kasnije odvaja ako je to potrebno. Osim toga, potrebno je i osigurati adekvatno skladištenje proizvedenog vodika, kako bi se mogao koristiti kada je to potrebno, a ne kada je proizveden. Za bolju efikasnost i isplativost poželjno je direktno povezivanje cjevovoda sa spremnicima za vodik, kao i međusobno povezivanje vodikovih spremnika [5].

## 2.5. Korištenje i sigurnost opskrbe vodika

Vodik predstavlja jedno od glavnih budućih “oružja” za dekarbonizaciju industrije i gospodarstva. Ima veliki potencijali široke primjene, pa se tako može osim u prometnom sektoru koristiti u rafinerijama kao sirovina, energetici, te kao zamjena za prirodni plin. Razvoj infrastrukture i kapaciteta za korištenje vodika treba se odvijati sukladno s rastom tržišta vodika i njegovom potražnjom. Na slici 5 nalazi se prikaz krajnjih korisnika vodika u procesu dekarbonizacije [5].

Vodik je potrebno uključivati zbog svoje ekološke prihvatljivosti i pouzdanosti u što veći broj sigurnosnih sustava vojne i civilne namjene. Idealan primjer bi bila primjena vodika kod



pričuvnih i rezervnih sustava u bolnicama i ostalim objektima koji koriste agregate na fosilna goriva. Primjene vodika u ovakvim sustavima mogu podići razinu sigurnosti korištenja u zatvorenim prostorima jer mogu potpuno neutralizirati emisije štetnih plinova koje nastaju iz fosilnih goriva, a štetno utječu na organizam čovjeka [5].



Slika 5. Krajnji korisnici vodika, [5]

## 2.6. Primjena drugih alternativnih izvora energije u zračnom prometu

Povećanjem prometa u zračnom prijevozu na međunarodnoj razini, rastu količine ispušnih štetnih plinova u atmosferi koje nastaju zbog različitih operacija na zračnim lukama i zrakoplovima prilikom manevriranja na tlu i zemlji. Postoje i drugi načini prema kojima zrakoplovstvo negativno utječe na ljude i okoliš, kao što je buka, zagađenje česticama, zagađivanje voda i tla u području oko zračne luke. Najveći problem na globalnoj razini predstavljaju sve veće emisije stakleničkih plinova i ostalih štetnih nusproizvoda koji nastaju sagorijevanjem iz fosilnih goriva, jer uzrokuju globalno zatopljenje iz čega posljedično nastaju klimatske promjene koje loše utječu na prirodni ekosustav i zdravlje živih bića. Zbog toga se sve veći naglasak i prioritet stavlja na smanjenje štetnih plinova i očuvanje ekosustava. Jedan od najvećih proizvođača štetnih plinova je prometna industrija. Zrakoplovstvo predstavlja jedno od najbrže rastućih izvora ugljikova dioksida, zbog čega je prelazak s fosilnih goriva na alternativne izvore energije neophodan.

Postoje različiti zahtjevi koje mora zadovoljiti pojedino alternativno gorivo da bi se ono uopće moglo početi koristiti u privatne, komercijalne ili neke druge svrhe. Osim onih glavnih, kao što je potreba za jednakom ili boljom energetsom vrijednošću u odnosu na fosilna goriva, kao i za izvore energije koji će emitirati manju količinu ispušnih plinova, vrlo bitni su i neki drugi kriteriji prema kojima se procjenjuje isplativost uporabe alternativnih izvora energije u zrakoplovstvu, a to su:

- svojstva goriva,
- masovna proizvodnja,
- ekonomska isplativost,
- sigurnost korištenja,
- ekološki učinak [8].

### 2.6.1. Električna energija

Jedan od osnovnih oblika primjene obnovljivog izvora energije u zrakoplovstvu je električna energija. Ona predstavlja perspektivnu tehnologiju koja se u današnje vrijeme sve više istražuje koja bi zasigurno mogla doprinijeti boljoj slici emisija štetnih plinova. Ova tehnologija donosi niz prednosti; korištenjem električne energije zrakoplovi postaju puno tiši, a letovi postaju sigurnijim. Osim toga, otvaraju se nova poslovna tržišta, dok se količina emisija može zadržati na sadašnjim razinama. S druge strane, kao i kod svih ostalih alternativnih izvora energije implementacija nailazi na probleme, koje pokušavaju riješiti organizacije diljem svijeta. Neki od najvećih problema s kojima se ova tehnologija susreće je gustoća energije baterije, učinkovitost modela, te regulativa vezana uz potencijalne nove pogonske sustave [9].

Zbog male gustoće energije zrakoplovi pogonjeni na električnu energiju imaju problem nedostatka potrebne snage za let, to predstavlja glavni problem ove tehnologije. Ako se usporede dva različita pogona zrakoplova; elektromotor i klipni motor, klipni motor ima čak 50 puta veću količinu energije po jedinici mase. Dok, ako se usporede njihove efikasnosti, elektromotor radi uz efikasnost od 95%, a standardni klipni motor od ukupne energije iskorištava samo 29% energije, ostatak se gubi kroz ispušnu cijev i trenje. Iz toga proizlazi podatak da zrakoplov koji je pogonjen na fosilno gorivo proizvod 15 puta više energije po masi od električne energije [10].

Jedan od značajnijih projekata ove tehnologije je program Airbusa E-Fan X iz 2017. godine u kojem električni motor snage 2 MW zamjenjuje jedan od 4 mlazna motora. Glavni cilj ovog projekta bio je postaviti temelje za daljnji razvoj i primjenu ove vrste pogona u komercijalnom zrakoplovstvu. Ovaj projekt predstavlja jednu od prvih primjena ove vrste u zrakoplovnoj industriji koji pospješuje razvoju ambicije u dekarbonizaciji zrakoplovstva [11]. Slika 6 prikazuje izgled zrakoplova projekta E Fan X.



**Slika 6.** Prikaz zrakoplova projekta E Fan X, [11]

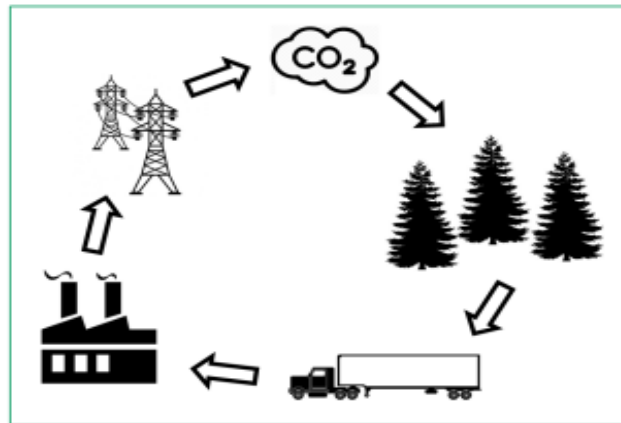
### 2.6.2. Biogoriva

U zračnom prometu se koristi pojam za nekonvencionalna fosilna goriva pod nazivom održiva zrakoplovna goriva (*engl. Sustainable Aviation Fuel – SAF*). Ova vrsta goriva predstavlja idealnu alternativu za kratkoročno korištenje jer ne zahtijevaju složenu implementaciju i razvoj kao zrakoplovi na neki drugi obnovljivi izvor energije, koji zahtijeva još puno istraživanja. Već su izvršena brojna istraživanja vezana uz ovaj oblik izvora energije. Prva istraživanja su izvršena još za vrijeme Drugog svjetskog rata, a kasnije i u sedamdesetim godinama prošlog stoljeća. U tadašnje vrijeme razlog njihova istraživanja je bio nedostatak goriva, dok je današnji razlog, povećana količina emisije štetnih plinova. Za proizvodnju biogoriva koristi se širok izbor različitih materijala od kojih su oni osnovni obrađeni dalje u tekstu.

Velika prednost biogoriva je u tome što imaju vrlo slična svojstva kao i fosilna goriva, zbog čega se mogu miješati bez ikakve opasnosti, zato nose naziv “*drop in*” goriva. Sukladno tome, za njihovu uporabu nisu potrebne nikakve dodatne zahtjevne preinake kao kod ostalih tradicionalnih goriva, što omogućuje obavljanje velikog broja letova koji su se obavili do danas [12].

Biomasa spada u obnovljive izvore energije i definira se kao nefosilna materija biljnog podrijetla. Primjenjuje se za proizvodnju električne energije i topline. Biomasa se koristi iz šumskog, poljoprivrednog i komunalnog otpada, a najčešće iz ostataka drva. Najbolji primjer biomase kao proizvođača izvora topline su pelete koje se dobivaju upravo iz drva. U nekim dijelovima svijeta biomasa se dobiva i iz životinjskog otpada. Prednost biomase je u njenoj jednostavnoj primjeni koja je moguća bez nekih velikih revolucionarnih rješenja, a uz to ima i slična svojstva kao i konvencionalno gorivo. Jedan od velikih izazova kod korištenja biomase je kako osigurati održivo korištenje šuma kako ne bi došlo do pretjeranih sječa i narušavanja životinjskog i biljnog ekosustava. Biomasi je najisplativije i najlakše proizvoditi na mjestima s velikim šumskim prostranstvom. Jedan od nedostataka biomase je i neizbježno korištenje

velikih kamiona koji su potrebni za prijevoz od korisnika do skladišta. Također, korištenje biomase uzrokuje stvaranje emisija CO<sub>2</sub>, iako su male, one i dalje predstavljaju štetan utjecaj na okoliš [13]. Slika 7 prikazuje kompletan ciklus ugljika iz ostataka drva pa do njegovog oslobađanja izgaranjem.



Slika 7. Ciklus ugljika biomase, [13]

Morske alge predstavljaju jedan od novijih načina dobivanja biogoriva velikog potencijala. Ova vrsta biogoriva može riješiti probleme neodrživosti koje imaju kopnena biogoriva. Znanja dobivena istraživanjem kopnenih biogoriva u većoj mjeri se mogu primijeniti i na morske alge. Istraživanja pokazuju da na svijetu postoji između 40.000 do 100.000 vrsta algi, a već su neke potvrđene pogodnim za proizvodnju biogoriva. S obzirom na veliki postotak vode u algama prikladne su mokre metode pretvorbe u gorivo kao fermentacija i AD (anaerobna digestija) [14].

Morske alge su ogroman izvor biomase koji je jako loše iskorišten, s obzirom na podatak da je 70% svijeta prekriveno morem iz čega se omogućava proizvodnja 50% biomase, dok je korištenje energije dobivene iz mora samo 2%. Do 2050. godine porast će potreba za hranom za 70%, dok će se iste te godine zadovoljiti potreba za energijom od samo 20%. Danas se najveći dio proizvodnje morskih algi odvija u Aziji, dok je proizvodnja u Europi još uvijek u početnoj fazi [14].

Specifičnost morskih algi je u tome što predstavljaju najbrže rastuće vrste na svijetu, pa tako imaju veliki potencijal u smislu produktivnosti i iskoristivosti. Smatraju se jednim od najučinkovitijih vrsta. Jedna od prednosti morski algi je u tome što rastu u slanoj vodi pa se za njihov uzgoj ne treba brinuti o dostupnosti pitke vode. Morske alge nije potrebno ni gnojiti jer su jako učinkovite u apsorpiranju hranjivih tvari, zbog čega se one mogu koristiti kao gnojivo. Negativna strana je ta da se proizvodnjom biogoriva iz morskih algi uz hvatanje i skladištenje ugljika emitiraju štetni plinovi uključujući CO<sub>2</sub> [14].

Prva istraživanja u kojima su se koristile alge kao sirovina za proizvodnju biogoriva su započela još 2008. godine od strane dvije zrakoplovne kompanije Lufthanse i Virgin Atlantica, što je rezultiralo i prvim letom zrakoplova pogonjenim biogorivom dobivenim iz morskih algi. U sljedećim godinama pa sve do danas vrše se daljnja istraživanja koja donose određene pomake, koji su ipak premali. Dijelom zbog predviđanja da se može ostvariti samo 5% ukupne proizvodnje goriva do 2050. godine [15]. Na ovoj tehnologiji i njezinoj održivosti mora se raditi još dugi niz godina jer je još uvijek u početnoj fazi, a zbog velikog potencijala kojeg ima smatra se da će se s vremenom ostvariti kvalitetna ponuda kerozina proizvedenog od algi po konkurentnoj cijeni.

### 2.6.3. Solarna energija

Solarna energija predstavlja vrlo perspektivan način proizvodnje energije za pogon zrakoplova. Svatko može osjetiti svojstva topline solarne energije dok stoji na suncu. Za primjer, energija kojom sunce zagrije zemljinu površinu u 60 minuta je veća od energije koju potroši cijela zemaljska kugla u jednoj godini. Primjena ove tehnologije u zrakoplovstvu je izvediva uz određene preinake. Ovaj sustav funkcionira na način da se prvo prikuplja solarna energija uz pomoć solarnih panela, odnosno ćelija, a zatim koristi za pokretanje elektromotora. Višak energije se skladišti u baterije za kasniju upotrebu kada je to potrebno. Iako je ova tehnologija jako dobra iz ekološkog aspekta, ona ne pruža dovoljnu gustoću energije odnosno snagu potrebnu za letove dugih doleta. Iz tog razloga sunčeva energija bi se mogla koristiti kod kraćih regionalnih letova. Solarni paneli moraju prekriti cijelu površinu krila zrakoplova koji bi energiju sunca pretvarali u električnu za pokretanje motora zrakoplova [16].

Sunčeva energija se već primjenjuje u zrakoplovstvu. Razvijeni su zrakoplovi koji su uspješno poletjeli uz pomoć ove tehnologije. Prvi let oko svijeta na solarni pogon izveden je 2016. godine. Odvijao se na relaciji od 40.000 km od Abu Dhabija do Hawaii u oba smjera. Zrakoplov kojim su Bertrand Piccard i Andre Borschberg izvršili ovaj let prikazan je na slici 8, a sastojao se od 4 propelerna motora s rasponom krila od 72 m [17]. Zadnjih godina postoji znatan broj novih eksperimentalnih letova koji dokazuju da letovi, pa i oni na većim relacijama su itekako mogući.



Slika 8. Zrakoplov HB-SIA, [18]

Jedan od novijih projekata i primjera korištenja ove vrste tehnologije u zračnom prometu je i koncept letjelice Falcon Solar (slika 9), vrsta zrakoplova koja radi na sunčevu energiju i izgledom podsjeća na pticu po kojoj je i dobio naziv. Nema pogonske sustave ni osnovne aerodinamičke elemente kao što su krilca i zakrilca, ali je proizveden sa svrhom da postavi temelj ove tehnologije i potakne proizvođače zrakoplova da krenu s proizvodnjom zrakoplova na sunčevu energiju. Dizajn ne nalikuje klasičnim zrakoplovima. Krila su delta oblika kao kod nadzvučnih zrakoplova, ali uz to su i zakrivljena što mu daje karakterističan oblik. Trup također stvara velik uzgon, a uz to pruža i veliku površinu za primjenu panela. Još se ne zna hoće li ovaj koncept ikada u potpunosti zaživjeti, ali predstavlja jako dobre temelje za daljnja istraživanja i implementaciju [19].



Slika 9. Izgled letjelice Solar Falcon, [19]

Osim primjene solarne energije kod zrakoplova, ona se ne treba zanemariti kod primjene na aerodromima. Zračne luke su idealna mjesta za solarne sustave zbog svojih velikih površina na tlu pa i na krovovima terminala. Prilikom postavljanja ovog sustava nužna je suradnja između inženjera s upraviteljima zračnih luka kako bi se uklonila mogućnost

zasljepljivanja pilota i kontrolore. Paneli se mogu postavljati na 3 načina: tlo, krov i u obliku nadstrešnica. Velik broj zračnih luka veći koristi ovaj izvor energije (slika 10), kao npr. zračna luka Atena, Ohio, Malta, Aruba, Brisbane a jedan od najboljih primjera je zračna luka u Indiji (*Cochin International Airport*) koja svu svoju električnu energiju proizvodi iz solarnih panela [20].



Slika 10. Prikaz zračnih luka koje koriste solarnu energiju, [20]

#### 2.6.4. Vjetroenergija

Energija vjetra jedna je od najodrživijih izvora energije kojom se može postići dekarbonizacija. Međutim, postoji problem u veličini vjetrojača koje mogu ugroziti sigurnost zrakoplova, naročito ako se postavljaju u neposrednoj blizini aerodroma. Zbog toga je potrebno odrediti i površine ograničenja prepreka iznad kojih se ne smiju nalaziti nikakvi objekti. Također, lopatice vjetroturbina stvaraju turbulencije koje mogu biti opasne za male zrakoplove, a imaju i negativan utjecaj na opremu za komunikaciju, navigaciju i nadzor. Bez obzira na to ova tehnologija ima veliki potencijal zbog čega se provode brojne studije s ciljem rješavanja gore navedenih problema [21]. Nekolicina zračnih luka koristi ovu energiju, a primjer zračne luke koja je uvela ovu tehnologiju je East Midlands iz Engleske koja je dala izgraditi dvije vjetroturbine visine 45 metara.

### 2.6.5. Nuklearna energija

Nuklearna energija se najviše istražuje u vojne svrhe. Pokretanjem NEPA (*eng. Nuclear Energy Propulsion of Aircraft*) 1946. godine od strane američkog generala Cutisa LeMaya započinju prva istraživanja. Kako se nuklearna energija temelji na fisiji, procesu razdvajanja atoma na manje dijelove što rezultira eksplozijom topline koja se koristi za dobivanje energije, glavni problem je bila nemogućnost izolacije flote od radijacije, zbog toga se nije pružalo previše prostora ovom obliku izvora energije u zrakoplovstvu. Razvojem elektromotora, nuklearnih reaktora, primjenom i razvojem bespilotnih letjelica, zrakoplovi ove tehnologije u današnje vrijeme postaju sve zanimljiviji i perspektivniji. Bespilotne letjelice rješavaju problem radijacije na letačko osoblje. Međutim, nuklearna energija se i dalje susreće s drugim nizom prepreka koji usporavaju razvoj ove tehnologije. Najveći su problemi vezani uz posljedice pada zrakoplova i otmice koji se moraju otkloniti istraživanjima u godinama koje dolaze [22].



### 3. POVIJESNI RAZVOJ VODIKA U ZRAČNOM PROMETU

Vodik u zrakoplovstvu ima pomalo neočekivanu dugu povijest, iako većina ljudi smatra da je primjena vodika zapravo plod novijih modernih era, vodik ima povijest skoro istu kao i mlazna goriva u zračnom prometu. Ovo poglavlje donosi pregled razvoja letenja na vodik kroz povijest.

Kao što je već spomenuto u radu, vodik ima jako dobra fizikalna svojstva, zbog čega je oduvijek bio primamljiv proizvođačima zrakoplova. Njegova istraživanja su započela krajem 19. stoljeća, a jedna od prvih ideja primjene vodika je bila uporaba balona koji su bili punjeni vodikom. Komercijalna uporaba cepelina započela je početkom 20. stoljeća i tada su predstavljali vrhunac tehnologije. Danas, su zabranjeni iz sigurnosnih razloga. Naime, 1937. godine dogodila se nesreća najpoznatijeg cepelina onoga doba-Hindenburga u kojoj je poginula nekolicina ljudi što je označilo kraj primjene cepelina na vodik, zbog čega se danas baloni koriste u nekomercijalne svrhe, a pune helijem [23].

Kod zrakoplova, vodik se počeo primjenjivati prvo u vojnoj industriji. Naglasak pri dizajniranju zrakoplova bio je na performansama zrakoplova, dok se u to doba nije marilo o ekološkim utjecajima pogonskih goriva. S vremenom, razvojem zrakoplovne industrije nakon Drugog svjetskog rata rastao je i interes za vodikom, te su se tako u drugoj polovici prošlog stoljeća razvili i prvi prototipovi zrakoplova na vodik u vojnom i civilnom zrakoplovstvu. Naime, ni dan danas nije došlo do komercijalizacije nijednog od zrakoplovnih pogonskih sustava na vodik. Međutim, to bi se u skorijoj budućnosti moglo promijeniti zbog vodikove ekološke prihvatljivosti i sve veće inicijative vezane uz uspostavljanje klimatske neutralnosti, od strane svih sudionika zrakoplovne industrije.

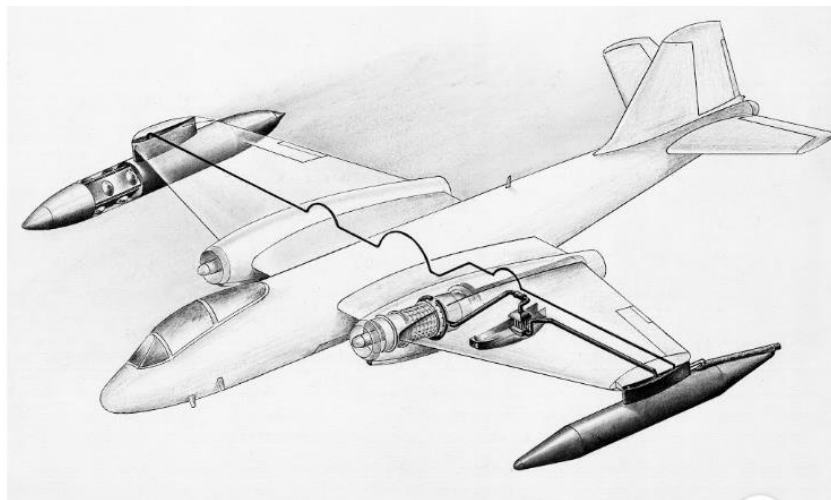
#### 3.1. Prvi zrakoplovi na vodik

Većina prototipova zrakoplova pogonjena na vodik iz 20. stoljeća je dizajnirana s motorima s unutarnjim izgaranjem. Tu se radilo najčešće u prenamjeni motora s unutarnjim izgaranjem, a ne o potpuno novom dizajnu motora. Postoji niz koncepata zrakoplova koji su razvijeni tijekom 20. stoljeća pa sve do danas koji su doprinijeli razvoju ove vrste tehnologije, a neki od najznačajnijih su obrađeni dalje u tekstu.

##### 3.1.1. Zrakoplov Martin B-57Canberra

Sad već davnih 1950-tih za vrijeme Hladnoga rata između Sjedinjenih Američkih Država i Sovjetskog saveza, Amerikanci su koristili špijunske zrakoplove naziva Lockheed U-2 za tajne operacije. Međutim, htjeli su novi zrakoplov boljih performansi koji bi mogao letjeti na visini

koja bi bila izvan dometa sovjetskih projektila. Upravo iz tog razloga pokrenut je "Projekt B" koji je dodijeljen Nacionalnom savjetodavnom odboru za aeronautiku (*eng. National Advisory Committee for Aeronautics - NACA*), čiji je zadatak bio razvoj i pokretanje zrakoplova na vodik. Uporabom vodika podigla bi se apsolutna gornja visinska granica na čak 90.000 ft. Za zrakoplov je izabran upravo Martin B-57 Canberra (slika 11) kao testni, jer su se istraživanja i testovi provodili korištenjem turbomlaznog motora Wright J65. Zamišljen je ugradnjom sustava za vodik koji bi bio u potpunosti odvojen od mlaznog klasičnog sustava. Sukladno tome, potrebno je bilo izvršiti i preinake na motoru [24].

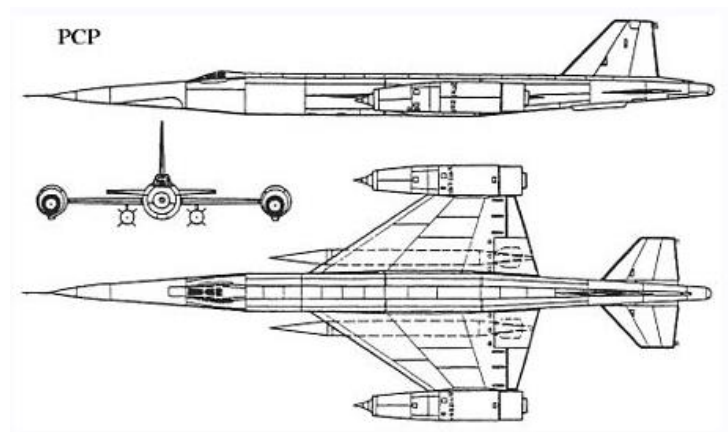


Slika 11. Zrakoplov Martin B-57 Canberra, [24]

Martin B-57 zamišljen je tako da bi polijetao uporabom mlaznog goriva, a kada bi došao na visinu veću od 50.000 ft jedan od motora bi se prebacio na vodik, dok bi se pri slijetanju ponovo vratio na standardno mlazno gorivo. Zrakoplov je imao dva spremnika na krajevima krila, gdje je jedno služilo za pohranu vodika, a drugo za pohranu helija. Helij je bio potreban zbog stvaranja tlaka u spremniku vodika. Prvi test je izvršen 1956. godine iznad jezera Erie zbog sigurnosti u slučaju pada zrakoplova. Nažalost bio je neuspješan. Kada je zrakoplov dosegao potrebnu visinu piloti su počeli s postupkom prebacivanja na vodik nakon čega su se javili problem u smislu velikih vibracija i ubrzanja zrakoplova, zbog čega su ugasili motor i vratili se nazad u bazu na jednom motoru. Drugi test je bio uspješniji, ali zbog slabog protoka goriva zrakoplov nije mogao obavljati operacije pri velikim brzinama. Konačno, 1957. godine održan je i treći probni let koji je bio uspješan i bez ikakvih problema. Ovi testovi su dokazali da je plovidba zrakoplova na tekući vodik itekako moguća, te da je skladištenje vodika u zrakoplovima itekako moguće. Naime, bez obzira na uspjeh ovog projekta daljnja istraživanja su obustavljena jer nije bilo potrebe za zrakoplovima na velikim visinama [24].

### 3.1.2. Zrakoplov CL-400 Suntan

Projekt Suntan je kodno ime projekta za izgradnju zrakoplova koji je trebao biti zamjena za zrakoplov Lockheed U-2. Američke snage htjele su zrakoplov velike brzine koji bi im služio za špijuniranje sovjeta. Projekt se provodio u tajnosti, a vojska je bila oduševljena. Suntan je imao oblik strelice i podsjećao je na svemirski brod, te je trebao postizati brzinu od 2,5 Macha na visini od 90.000 ft. Naime, neki dijelovi koncepta su bili uspješni, no bez obzira na to nisu riješeni glavni problemi zbog kojih ova projekt nikada nije do kraja proveden. To su problem s kojima se inženjeri i dan danas suočavaju. Prvi je vezan uz skladištenje vodika, dok je drugi vezan uz proizvodnju i skupu infrastrukturu za njegovo korištenje u usporedbi s fosilnim gorivima. Također, dolet zrakoplova postao je preskup kao i njegov razvoj zbog čega su na kraju i čelni ljudi toga projekta zagovarali ideju o njegovom ukidanju. CL-400 Suntan nikada nije poletio, ali je donio niz poboljšanja i novih mogućnosti u primjeni vodika kod zrakoplova, a kasnije i u svemirskom programu [25]. Slika 12 prikazuje tlocrt, bokocrt i nacrt zrakoplova CL-400 Suntana.



**Slika 12.** Tlocrt, bokocrt i nacrt zrakoplova CL-400 Suntan, [25]

### 3.1.3. Zrakoplov Tupoljev 155

Sovjetski savez zbog manjih količina izvora nafte u to vrijeme se sve više zanima za novim alternativnim izvorima energije krajem 80-ih. Tako su zbog ekonomske krize pokrenuli istraživanja vezana uz primjenu vodika kao alternativnog goriva u zrakoplovstvu. Plan je bio izvršiti preinake na putničkom zrakoplovu Tu-154 i prenamijeniti ga u zrakoplov koji je pogonjen na vodik. Modificiranu verziju zrakoplova Tu-154 nazvali su Tu-155. To je bio prvi putnički zrakoplov pogonjen na vodik iako to on nikada zapravo nije bio [26]. Vodik se u to vrijeme smatralo gorivom nove generacije zbog malog utjecaja na okoliš, dok veliki troškovi proizvodnje nisu predstavljali prepreku. Prvi let je izvršen 1988. godine, a ukupno je izvršeno

pet probnih letova na vodik. Tu-155 je bio opremljen s tri turbomlazna motora NK-88 od koji je jedan bio zamišljen na vodikov pogon, dok su druga dva pogonjena kerozinom. Količina vodika dovoljna za dvosatni let bila je pohranjena u posebnom spremniku u repu zrakoplova. U planu je bila i modifikacija zrakoplova u Tu-156, ali ona nikada nije ostvarena zbog raspada SSSR-a [26]. Slika 13 prikazuje izgled prvog putničkog zrakoplov na vodikov pogon.



**Slika 13.** Zrakoplov Tu-155, [26]

#### 3.1.4. Zrakoplov Diamond HK36 Super Dimona

Diamond HK36 Super Dimona predstavlja prvu letjelicu s ljudskom posadom koja je pogonjena gorivim ćelijama. Boeing je u suradnji s europskim kompanijama modificirao motornu jedrilicu Dimonu, čiji je prvi probni let bio 2008. godine. Pogonjena je hibridnim sustavom s gorivim člancima i litij-ionskim baterijama koje su služile za pokretanje elektromotora koji je bio spojen na propeler. Glavni dio motora od 75 kW se upotrebljavao pri zahtjevnijim radnjama koje iziskuju najviše snage, dok se drugi dio motora na gorive ćelije koji je trošio plinoviti vodik koristio za nadopunjavanje baterijskog napajanja, dok je goriva ćelija bila sama dovoljna za horizontalni let. Nadalje, izvršene su neke od modifikacija; novi sustav goriva, novi sustav upravljanja, raspon krila i konstrukcija same letjelice. Jedna od negativnih stvari je sama težina hibridnog sustava za koju se procjenjuje da je za 150 kg veća od sustava s unutarnjim izgaranjem, što predstavlja problem za tako mali zrakoplov. Razvojem današnje tehnologije i primjenom novih sustava gorivih ćelija ovaj problem bi se mogao uvelike neutralizirati [25].

#### 3.1.5. Zrakoplov Antares DLR H2

Njemačko ministarstvo prometa daje zadatak provedbe razvojnog projekta Njemačkom svemirskom centru (*eng. German Aerospace Center-DLR*) s ciljem provedbe

aeronautičkog istraživanja i razvoja novog zrakoplova pogonjenog na vodik. DLR H2 je prvi zrakoplov s posadom na vodikov pogon s mogućnošću samostalnog polijetanja, slijetanja i krstarenja bez pomoći drugi izvora energije, snage motora od 33 kW. Razvijen je kao modifikacija motorne jedrilice Antares 20E, a prvi probni let održan je 2009. godine u Hamburgu. Bio je namijenjen za jednog člana posade. Sustav za pokretanje i skladištenje je smješten u dva vanjska spremnika koja su smještena ispod krila i ojačana posebnim materijalima. Ovisno o režimu letenja mogu biti opremljeni sa sustavom gorivih ćelija ili baterijama visoke energije, a jedna od opcija je korištenje i hibridnog sustava ove dvije tehnologije. To omogućava veću iskoristivost jednog i drugog sustava, čime se širi spektar mogućih opcija misija ovog koncepta zrakoplova [27].

Cilj ovog projekta je bio razviti pouzdani sustav gorivih ćelija kao pogonski sustav za komercijalne zrakoplove. Gorive ćelije se smatraju jako dobrom alternativom jer pružaju visok stupanj učinkovitosti uz jako male emisije štetnih plinova. Tijekom prve faze projekta, DLR je zajedno u suradnji s Airbusom razvio sustav gorivih ćelija koji omogućava rezervni sigurnosni sustav napajanja hidrauličkih pumpi za testni zrakoplov DLR projekta, Airbusa A320 ATRA ako dođe do nestanka struje. Druga faza predstavlja razvoj gorivih ćelija u primjeni na zemlji, čime se omogućava taksiranje zrakoplova na zemlji. Daljnji fokus je stavljen zapravo na poboljšanje efikasnosti i poboljšanje performansi zrakoplova. DLR je potpisao ugovor s tvrtkom Lange Aviation koja je proizvela motornu jedrilicu Antares 20E s ciljem poboljšanja i očuvanja znanja tehnologije gorivih ćelija. Iz tog razloga sustav gorivih ćelija na DLR H2 je gotovo identičan onome na zrakoplovu A320 ATRA. U testu koji je izveden 2009. godine dokazana je funkcionalnost ove tehnologije pri smanjenom tlaku na većim visinama uspješnim letom u kojem je dostignuta visina od 2.558 metara [27].

Par godina kasnije napravljena je nova poboljšana verzija s nekoliko važnih preinaka. Jedna od njih je novi i moderniji sustav gorivih članaka koji je omogućio veću količinu prostora, zbog čega je usisnik pozicioniran u gornjoj polovici spremnika dok je rashladni kanal bio ispod nosača tereta. Također, povećan je i kapacitet spremnika vodika s 2 kg na 5 kg pod tlakom od 350 bara. A poboljšana je i elektronika zrakoplova zbog potrebe za boljim praćenjem rada zrakoplova [27]. Slika 14 prikazuje unutrašnjost kabine Antares DLR H2.



Slika 14. Izgled kabine Antaresa DLR H2, [28]

### 3.1.6. Zrakoplov DLR HY4

DLR HY4 je vrlo specifična i upečatljiva konfiguracija zrakoplova koju je razvila njemačka zrakoplovna kompanija H2FLY. Slika 15 prikazuje njegov karakterističan izgled. Smatra se prvim pravim putničkim zrakoplovom koji je pogonjen na vodik koji je dosegao visinu od 2.134 metra. Prvi puta je predstavljen u Stuttgartu 2016. godine nakon niza uspješnih testova [29].

Sastoji se od dva trupa s ukupno četiri sjedala. Pogonjen je motorom snage 80 kW, što je najviše u usporedbi s drugim zrakoplovima ove tehnologije. Razvijen je na temelju zrakoplova Pipistrel Taurus G4. Međutim, dok je Pipistrel pogonjen na električnu energiju, HY4 je pogonjen hibridnim nisko temperaturnim sustavom gorivih ćelija. Ovaj zrakoplov poseban je i po nekim od novih postignuća. Naime, njime je izveden let između dviju velikih komercijalnih zračnih luka na udaljenosti od 124 km. Brzina krstarenja je do 145 km/h, a dolet 1.500 km. Razmišljalo se i o smanjenju težine, zbog čega se vodik pohranjivao u posebnim spremnicima koji su načinjeni od kompozitnih materijala pod tlakom od 5.800 psi ravnomjerno u dva spremnika. Rad zrakoplova temelji se na gorivim ćeljcima, dok baterije osiguravaju dodatnu energiju u nekim zahtjevnijim radnjama zrakoplova. Trupovi zrakoplova povezani su sa srednjim trupom na kojem se nalazi propeler koji se nalazi ispred pogonskog sustava. Sistem rada temelji se na gorivim ćeljcima koji pretvaraju vodik u električnu energiju koja se koristi za pokretanje elektromotora, pri čemu se kao jedini nusprodukt izdvaja vodena para. Ova konfiguracija zrakoplova predstavlja izvrstan temelj za razvoj daljnje tehnologije vodika u godinama koje slijede, zbog čega predstavnici H2FLY-a smatraju da će vrlo brzo doći do proizvodnje zrakoplova koji će prevoziti i do 40 putnika na udaljenostima većim od 2.000 km [29].



Slika 15. Zrakoplov DLR HY4, [29]

### 3.2. Primjena vodika u današnje vrijeme

Kao što je i navedeno u dosadašnjem dijelu rada, zrakoplovi pogonjeni na vodik imaju neočekivano jako dugu povijest, te su već letjeli u prošlosti jako puno puta. Međutim, kao i kod primjene svih drugih alternativnih izvora energije problem predstavljaju neki tehnički izazovi. Iako je zanimanje za ovu tehnologiju relativno palo, nedavno usvojeni planovi i strategije vezane uz dekarbonizaciju ponovo su pobudile interes industrije i ostalih kompanija. Realnost je takva da je razvoj ove tehnologije i dalje na početnoj razini, tako je međunarodna energetska agencija (*eng. International Energy Agency - IEA*) dodijelila ovoj tehnologiji još uvijek fazu prototipa, zbog čega se procjenjuje da komercijalni zrakoplovi s vodikovim pogonskim sustavom neće biti dostupni do 2035. godine [30].

Iako se razvoj vodika kao pogonskog goriva odvija slabim tempom, postoji niz projekata i istraživanja koji bude nadu u svjetliju budućnost i ka napretku ove tehnologije. Postoji nekoliko projekata koji su u fazi razvoja, a baziraju se na modificiranju turboelisnih zrakoplova s ciljem uvođenja pogonskih sustava na gorive ćelije, odnosno vodik. Jedan od projekata je HEAVEN. Provodi se u Španjolskoj, a financiran je sredstvima iz EU. Plan je razviti sustav za skladištenje tekućeg vodika koji je već i izrađen, i izvršiti ugradnju u testni zrakoplov. Nadalje, probni letovi su trebali biti izvršeni 2022. godine, ali su se zbog određenih komplikacija odgođeni. Također, sličan projekt vodi i Njemački zrakoplovni svemirski institut u suradnji s tvrtkom Deutsche Aircraft, čiji je plan integrirati sustav gorivih ćelija u zrakoplov Dornier 328 s turboelisnim motorom. Probni let je planiran za 2025. godinu. Jedan od sličnih primjera je i projekt Nizozemskog konzorcija koji je financiran od strane nizozemske vlade sa svrhom razvoja zrakoplova s vodikovim pogonom kapaciteta 40-80 putnika. Kraj projekta predviđen je za 2028. godinu u kojoj bi se treba izvršiti let između Londona i Nizozemske. Jedan od glavnih aktera koji može imati najveći utjecaj na ovu tehnologiju je Airbus, koji je u sklopu svoga programa ZEROe pokrenuo razvoj tri različita koncepta hibridnog zrakoplova na vodik. Najveći od ta tri bi trebao biti turboventilatorski zrakoplov, kapaciteta do 165 putnika.

Prema projektu plan je isporučiti prve zrakoplove do 2035. godine. Ovi projekti iziskuju velika financijska ulaganja, a paralelno i ogroman rizik zbog čega projekt ZERO predstavlja znak za svijetlu budućnost ove vrste goriva [30].



## 4. REGULATORNI OKVIR ZA IMPLEMENTACIJU VODIKA U ZRAKOPLOVSTVU

S ciljem razvoja i primjene vodikove tehnologije, neophodno je razviti niz strategija i propisa prema kojima će se omogućiti pravilna priprema, implementacija i opravdanost za uvođenje ove vrste tehnologije u zračnu industriju. Sukladno tome, u ovom poglavlju prikazan je detaljni pregled regulatornog okvira na međunarodnoj, europskoj i nacionalnoj razini koji su relevantni za uvođenje vodika u zrakoplovstvo.

### 4.1. Međunarodna razina

Na međunarodnoj razini glavnu ulogu imaju organizacije kao npr. Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo (*eng. International Civil Aviation Organization - ICAO*) i Međunarodna energetska agencija (*eng. International Energy Agency - IEA*) koje potiču istraživanja i uvođenje obnovljivih izvora energije u zrakoplovstvo, a jedan od njih je upravo tema ovoga rada-vodik. Kao što je već navedeno potrebno je postaviti određene standarde i smjernice koje bi pridonijele implementaciji ovog oblika energije. Neki od ključnih dokumenata i inicijativa su:

- CORSIA (*eng. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) Program za neutralizaciju i smanjenje emisija ugljika za međunarodno zrakoplovstvo
- ICAO Izvješće o okolišu 2022 (*eng. ICAO Environmental Report 2022*)
- Odluka A39-2: Konsolidirana izjava o kontinuiranoj politici i praksi ICAO-a vezano za zaštitu okoliša (*eng. Resolution A39-2: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection*)
- Agenda 2030–održivi razvoj (*eng. The 2030 Agenda for sustainable development*).

Navedeni dokumenti predstavljaju samo jedan dio šireg spektra inicijativa na međunarodnoj razini koji su bitni za promicanje i uvođenje alternativnih izvora energije, uključujući i vodik. Neki od njih bit će obrađeni dalje u radu.

#### 4.1.1. CORSIA – Program za neutralizaciju i smanjenje emisija ugljika za međunarodno zrakoplovstvo

CORSIA predstavlja međunarodnu inicijativu koja je usvojena 2016. godine od strane ICAO-a kao odgovor na sve veći problem klimatskih promjena i sve većeg utjecaja zračnog prometa na zemljinu biosferu. Prvi puta se spominje još 2009. godine nakon čega ima stalnu

potporu ICAO-a. Usvojena je kao dodatak 16 Čikaške konvencije, a odnosi se na međunarodne letove. Od povijesnog je značaja jer je to prvi puta da je neka od grana sektora prihvatila svjetske tržišne mjere vezane uz područje klimatskih promjena. Primarni cilj je postići potpunu dekarbonizaciju svjetskog zračnog prometa, a plan je da se provede kroz nekoliko faza. Prva faza je vezana uz dobrovoljno izvršavanje mjera, a počela je 2021. godine pa sve do 2023. godine. Nakon toga slijede tri obavezne faze koje će obuhvatiti kompletan promet, dok je krajnji cilj da se do 2023. godine postigne potpuna neutralnost emisija CO<sub>2</sub> [31].

#### 4.1.2. ICAO Izvješće o okolišu 2022

Ovaj dokument uključuje izvještaj o stanju okoliša i održivosti u zračnom prometu kao i detaljne informacije o pojedinim istraživanjima i inicijativama vezanim uz obnovljiva goriva s malim emisijama ugljika. Također, pruža prikaz mjera donesenih od strane ICAO-a kao i pregled napretka tih istih mjera. Važnost ovog dokumenta je što daje nove informacije o tehnološkim naprecima, izazovima i mogućim scenarijima za primjenu novih vrsta goriva, uključujući i vodik, a daje smjernice za buduće korake i inicijative s ciljem ostvarivanja održivog zrakoplovstva [32].

#### 4.1.3. Odluka A39-2: Konsolidirana izjava o kontinuiranoj politici i praksi ICAO-a za zaštitu okoliša

Ovaj dokument predstavlja ambicioznu viziju u borbi protiv klimatskih promjena. Njime se postava cilj globalnog poboljšanja učinkovitosti goriva od najmanje 2% do 2050. godine. Ova odluka ne ostavlja svu odgovornost na države i organizacije, nego ih potiče na konkretno sudjelovanje i zajedničku suradnju sa svrhom postizanja zacrtanoga cilja. Time se i stvara perspektivan okvir za suradnju i konstantno usavršavanje koji pomaže ostvariti održiviju budućnost za naš planet i potiče se uvođenje alternativnih goriva u zračni promet. [33].

#### 4.1.4. Agenda 2030 – Održivi razvoj

Ovaj dokument predstavlja strateški plan djelovanja koji je usvojen od strane svih članica Ujedinjenih Naroda 2015. godine. Cilj je zapravo omogućiti ekonomski, ekološki i socijalni razvoj diljem svijeta do 2030. godine. Dokument se bazira na 17 ciljeva koji se bave rješavanjem najvažnijih prepreka u vidu ostvarivanja održivosti. Agenda 2030 stavlja naglasak na razvoj i uporabu obnovljivih izvora energije u svim sektorima industrije, uključujući i zrakoplovstvo [34].

## 4.2. Europska razina

Na razini Europske unije postoji niz dokumenata, smjernica i inicijativa koje su vezane uz implementaciju vodika u zrakoplovstvo. Neki od ključnih dokumenata su sljedeći:

- Europski zeleni plan
- Izvješće o strategiji zrakoplovstva za Europu
- Europska vodikova strategija (*eng. European Hydrogen Strategy*)
- Europski plan za obnovu (*eng. NextGenerationEU*)
- Europska inicijativa za čisto zrakoplovstvo (*eng. European Clean Aviation Initiative*)
- Čisto nebo (*eng. Clean Sky*).

### 4.2.1. Europski zeleni plan

Sve lošije klimatsko stanje doseglo je svoj vrhunac 2019. godine iz kojeg razloga je parlament proglasio izvanredno stanje kako bi se smanjila količina emisija štetnih plinova. Te iste godine kao jedna od mjera i odgovora za navedeno je Europski zeleni plan koji predstavlja ključ buduće klimatski neutralne i održive EU. Cilj ovog projekta je postići smanjenje emisija stakleničkih plinova za 55% do 2030. godine, a klimatsku neutralnost do 2050. godine. Mjere vezane uz zrakoplovstvo vežu se uz određivanje cijena goriva i promociju obnovljivih izvora energije [35].

### 4.2.2. Izvješće o strategiji zrakoplovstva za Europu

Zrakoplovstvo predstavlja ključan strateški sektor ulaganja koji ima još puno potencijala za dodatna istraživanja i postavljanje dugotrajnih ciljeva glede očuvanja okoliša. Zbog sve većih emisija CO<sub>2</sub> koje nastaju iz zrakoplovstva, potiče se niz već ostvarenih ili planiranih mjera s ciljem smanjenja emisija. Ovaj dokument donosi informacije prema kojima se smatra da je potrebno što više ohrabrivati nove projekte i inicijative koje teže zaštititi okoliša kao i smanjenju drugih štetnih učinaka koje zračne luke i zrakoplovi ostvaruju. Predlažu se alternativna goriva, novi sustavi certificiranog recikliranja, odlaganja i uporabe koji će biti prema pravilima koja nalažu odgovorne organizacije [36].

### 4.2.3. Europska vodikova strategija

Europska komisija smatra da je vodik ključni element njenog plana čiste energije. U srpnju 2020. godine komisija je iznijela strategiju s ciljem poticanja razvoja zelenog vodika iz

obnovljivih izvora energije kako bi postao jedan od važnijih ako ne i ključan izvor energije u Europi do 2050. godine. U razdoblju između trećeg tromjesečja 2020. i prvog 2022. godine, Europska unija uspjela je ostvariti uspješno svih 20 planiranih točaka vodikove strategije. Zbog perspektive koju vodik ima EU naporno radi na promicanju vodika kao ključnog segmenta za prijelaz na čistu energiju [37].

#### 4.2.4. Europski plan za obnovu

Uz veliki broj inicijativa i projekata Europa ide prema ostvarenju cilja da postane prvi kontinent koji će do 2050. godine postići klimatsku neutralnost što znači da se neće proizvesti više emisija stakleničkih plinova nego što se može prirodno apsorbirati. Koristeći sredstva iz ovog fonda, plan je ulagati u ekološki prihvatljive tehnologije. Također, plan je ulagati u javni prijevoz, učinkovitost zgrada i javnih prostora. Ove radnje imaju zajednički cilj stvaranja održivog i zelenog europskog društva koje se kao takvo može oduprijeti klimatskim promjenama [38].

#### 4.2.5. Europska inicijativa za čisto zrakoplovstvo

Ovaj program se temelji na tri glavne smjernice, a odnose se na istraživanja, inovacije i demonstracijske napore čiji je cilj smanjiti emisije zrakoplova u godinama koje slijede. Svaki od ovih smjerova ima za cilj razviti tehnologije i poticati napredak, koristeći osnovna znanja i kapacitete kako bi se smanjio rizik povezan s identificiranim tehnologijama i rješenjima.

Smatra se da bi ovaj plan mogao uvelike utjecati na emisije regionalnih zrakoplova ali i zrakoplova srednjeg do dugog doleta. Tako je cilj smanjiti emisije dobivene sagorijevanjem goriva za 50% do 2035. godine, dok bi se ukupne emisije trebale smanjiti za 90% [39].

#### 4.2.6. Čisto nebo

Čisto nebo (*eng. Clean Sky*) je ključni istraživački i inovacijski program Europske unije koji je pokrenut 2008. godine s ciljem razvijanja tehnologija za smanjenje emisija i buke u zrakoplovstvu te povećanje energetske učinkovitosti. Jedan od glavnih ciljeva je potaknuti prelazak na alternativne izvore energije i uspostaviti održivu transformaciju europske zrakoplovne industrije. Ovaj projekt predstavlja javno-privatno partnerstvo između Europske unije i europske zrakoplovne industrije koje omogućuje zajedničko ulaganje u istraživanje i razvoj. Projekt je podijeljen na dvije glavne faze. Prvu koja obuhvaća razdoblje od 2008. do 2017. godine, a naziva se Clean Sky 1. Druga faza obuhvaća period od 2014. godine do 2023,

godine. Svaka od njih se razlikuje po različitim tehnološkim izazovima i ciljevima. Clean Sky sastoji se od različitih istraživačkih programa koji su fokusirani na različite segmente zrakoplovne industrije, od aerodinamike, goriva, materijala itd. Zbog svega navedenog ovaj projekt slovi kao ključan korak za ostvarenje održivosti i inovacija s ciljem smanjenja utjecaja klimatskih promjena [40].

### 4.3. Nacionalna razina

Strateški dokumenti na nacionalnoj razini vezani uz implementaciju vodika i uvođenje drugih alternativnih izvora energije u zrakoplovnu industriju su:

- Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu
- Nacionalna razvojna strategija Republike Hrvatske do 2030. godine
- Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine
- Nacionalni plan oporavka i otpornosti 2021. – 2026.

#### 4.3.1. Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu

Na prijedlog vlade Republike Hrvatske Hrvatski sabor 28. veljače 2020. godine donosi dokument naziva; Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. godine s pogledom na 2050. godinu. Glavni cilj ovog projekta je napraviti korak prema ostvarenju cilja postizanja niskih stopa emisija ugljika, te omogućiti siguran prijelaz na novo razdoblje prihvatljivije energetske politike koja bi omogućila sigurnu, kvalitetnu i ekološki prihvatljiviju potrošnju bez udara na državni proračun [41].

Strategija se temelji na potrebi koordinirane uloge državnih institucija kako bi se ostvarili postavljeni ciljevi. Proces tranzicije je financijski vrlo zahtjevan a temelji se na privatnome sektoru i kapitalu za financiranje projekata za obnovljive izvore energije. Sukladno tome, glavni naglasak se stavlja na tvrtke, financijske institucije, različite fondove kao i prihode od naknada za emisije CO<sub>2</sub>. Ovaj princip razvoja energetskeg sektora doprinosi usklađenosti ublažavanja klimatskih promjena na globalnoj razini. Energetske strategije ne mogu biti uspješne izolirane, već je potrebno raditi na globalnom smanjenju emisija stakleničkih plinova. Trenutno Republika Hrvatska nadmašuje prosjek EU po udjelu obnovljivih izvora energije i emisijama ugljikova dioksida po stanovniku. Postignuća ciljeva ove strategija pružaju mogućnost gospodarskog razvoja, novih istraživanja i inovacija te plasiranje hrvatskih tvrtki na globalno tržište energetskeg rješenja [41].

#### 4.3.2. Nacionalna razvojna strategija Republike Hrvatske do 2030. godine

U današnjem svijetu koji se mijenja strelovitom brzinom i suočava s nizom izazova poput klimatskih promjena, strategije budućnosti su neophodne i važnije nego ikada. Stoga je nužno poduzeti određene korake kako bi se izvršila prilagodba svim izazovima i iskoristio potencijal koji nam pruža ovaj planet. Sukladno tome, Hrvatska se suočava s potrebom da unaprijed definira svoju budućnost koristeći prednosti članstva u Europskoj uniji. To zahtjeva jasno definiranje dugoročne vizije i postavljanje konkretnih ciljeva do 2030. godine.

Vlada Republike Hrvatske je iz tog razloga 2018. godine pokrenula postupak izrade Nacionalne razvojne strategije do 2030. godine, čija je svrha usmjeravati dugoročni razvoj društva i gospodarstva. Temelj ove strategije je u analizi ekonomske konkurentnosti Hrvatske te prepoznavanju izazova na svim društvenim razinama. Ovaj dokument uključuje jasnu viziju Hrvatske u 2030. godini, put razvoja i postavljanje strateških ciljeva. Ključ uspjeha je da svi sudionici društva udruže snage kako bi ostvarili postavljene ciljeve iz ove strategije i oblikovali Hrvatsku prema predviđenom scenariju. Ciljevi su usklađeni s ciljevima Europskog zelenog plana što će zasigurno povećati ostvarivost i mogućnost provedbe ove strategije [42].

Neki od strateških ciljeva vezanih uz tehnologiju vodika su:

- Strateški cilj (SC) 8. Ekološka i energetska tranzicija za klimatsku neutralnost.
- Strateški cilj (SC) 10. Održiva mobilnost [42].

Prema navedenim strateškim ciljevima u području zračne industrije, kontinuirano će se nastaviti investicije u razvoju zračnih luka s glavnim ciljem poboljšanja pružanja usluga, povećanja sigurnosti i unaprjeđenju dostupnosti zračnih luka [42].

#### 4.3.3. Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine

Prema strategiji za vodik do 2050. godine postavljeni su svi strateški ciljevi za razvoj vodikom poticanog gospodarstva. Vodik je već duže vremena jedan od glavnih predmeta rasprave i važan dio planova ne samo na europskoj nego i na svjetskoj razini. Implementacija vodika kao inovativnog nositelja energije u prometnom sektoru RH mora biti popraćena novim zakonskim okvirom čime će se stvoriti novi standardi specifični za vodik kao alternativno gorivo tijekom cijelog njegovog vrijednosnog lanca, od same proizvodnje pa do korištenja [43].

Cilj ove strategije je promicati održivu mobilnost i smanjiti emisije u prometnom sektoru uvođenjem vodika kao alternativnog goriva što ima za posljedicu smanjenje emisija i negativnog utjecaja na okoliš. Kako bi se omogućila integracija vodika u prometu nužno je izgraditi potrebnu infrastrukturu, a paralelno s tim poticati upotrebu, razvoj vozila i

zrakoplova koji su pogonjeni na vodik. Na ovaj način će se povećati potražnja za vodikom te potaknuti ulaganja u infrastrukturu [43].

#### 4.3.4. Nacionalni plan oporavka i otpornosti 2021. – 2026.

S ciljem ublažavanja posljedica prouzročenih pandemijom COVID-19 Republika Hrvatska razvila je poseban program, Nacionalni plan oporavka i otpornosti (NPOO). U kontekstu zračnog sektora plan se usredotočuje na nekoliko ključnih područja:

- održivost zračnog prometa: naglasak se stavlja na smanjenje emisija stakleničkih plinova i ekološki prihvatljivijih tehnologija. To uključuje poticaje za modernizacijom flota zrakoplova,
- infrastrukturni razvoj: ulaganja u infrastrukturu zračnih luka i terminala mogu osigurati bolju učinkovitost i održivost zračnog prometa,
- jačanje otpornosti sektora: mjere vezane uz osiguravanje financijske stabilnosti i organizaciju za krizne situacije,
- podrška turističkom sektoru [44].

## 5. PREDNOSTI I NEDOSTACI PRIMJENE VODIKA U ZRAKOPLOVSTVU

Uvođenje vodika u zrakoplovstvo kao pogonskog goriva predstavlja veliki potencijal za smanjenje emisija i štetnog utjecaja na okoliš, ali isto tako paralelno donosi niz infrastrukturnih, ekonomskih i tehničkih izazova koje treba detaljno istražiti i ukloniti kako bi primjena ove tehnologije bila održiva. Velika većina današnjih zrakoplova koristi kerozin kao pogonsko gorivo koje se dobiva iz sirove nafte a čijim izgaranjem nastaju štetni produkti. Iz tog razloga glavni izazov zrakoplovstva je dekarbonizacija koja se nastoji postići uporabom novih alternativnih izvora. Vodik se smatra vrlo perspektivnim pogonskim gorivom jer se njegovom primjenom ne emitira ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>). Moguća je primjena vodika kroz dva osnovna pogonska sustava: PEMFC (*engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cells*) gorivi članci i motori s unutarnjim izgaranjem pogonjeni na vodik. Implementacijom ovih tehnologija zrakoplovna industrija se preusmjerava prema ekološki prihvatljivijem i održivijem budućem modelu čiji je krajnji rezultat smanjenje klimatskih promjena.

### 5.1. Prednosti primjene vodika u zračnom prometu

Kao što je već spomenuto u radu, primjena tekućeg vodika kao alternativnog goriva u zrakoplovstvu donosi niz prednosti koje doprinose održivosti i smanjenju negativnih utjecaja na okoliš. Neke od ključnih prednosti su navedene i opisane u nastavku rada, a to su:

- nulte emisije CO<sub>2</sub>,
- niske emisije štetnih tvari,
- visoka energetska učinkovitost po masi,
- prihvatljiva ekološka proizvodnja,
- smanjenje buke,
- sigurnost.

#### 5.1.1. Nulta emisija CO<sub>2</sub>

Vodik kao pogonsko gorivo ne sadrži ugljik zbog čega njegovo izgaranje ne uzrokuje emisije CO<sub>2</sub>. Sukladno tome, vodik bi trebao omogućiti potpunu eliminaciju CO<sub>2</sub> tijekom svih operacija zrakoplova i tijekom cijelog ciklusa energije ako se proizvodi iz obnovljivih izvora energije. Prilikom sagorijevanja vodik u reakciji s kisikom stvara vodenu paru (H<sub>2</sub>O) kao glavni produkt izgaranja i vrlo male količine dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>). Nadalje, prednost vodika je u tome što se može proizvesti iz obnovljivih izvora energije čime bi se i u ovoj fazi vrijednosnog lanca vodika izbjegle emisije CO<sub>2</sub>. Također, istraživanja pokazuju da bi se emisije NO<sub>x</sub> mogle



smanjiti za 50-80% korištenjem tehnologije vodika sa unutarnjim izgaranjem, dok se uporabom gorivih ćelija mogu postići nulte emisije NO<sub>x</sub> i čestica [45].

#### 5.1.2. Niske emisije štetnih tvari

Primjena vodika u zrakoplovstvu donosi sa sobom iznimno značajne prednosti u vidu smanjenja emisija štetnih tvari. Osim već navedene potpune eliminacije CO<sub>2</sub>, zrakoplovni motori na vodik proizvode minimalne ili gotovo nikakve količine čestica koje su prisutne kod motora pogonjenih na kerozin što uzrokuje bolju kvalitetu zraka. Zbog visokih temperatura izgaranja kod konvencionalnih motora nastaju vrlo štetni dušikovi oksidi, dok to nije slučaj kod vodika koji eliminira nastanak NO<sub>x</sub> emisija jer ne sadrži dušikove okside. Nadalje, nema pojave emisija sumpornih oksida (SO<sub>x</sub>) kao ni pojave štetnih ugljikovodika koju su vrlo štetni za ozonski sloj atmosfere. Niske razine emisija štetnih tvari čine vodik privlačnom opcijom u potrazi za ekološki prihvatljivim rješenjima u zrakoplovnom sektoru [45].

#### 5.1.3. Visoka energetska učinkovitost po masi

Visoka gustoća energije po masi predstavlja jednu od ključnih prednosti vodika kao goriva. Energetska gustoća predstavlja količinu energije koja se može pohraniti u jedinici mase goriva. Kada govorimo o vodiku, njegova gustoća je vrlo visoka što u prijevodu znači da može pohraniti velike količine energije u maloj količini goriva. Međutim, vodik je najlakši element zbog čega je za prijenos jednog kilograma vodika potrebno jako puno volumena, što predstavlja izazov u pohrani vodika koji će biti detaljnije opisan u sljedećem poglavlju rada [4].

#### 5.1.4. Prihvatljiva ekološka proizvodnja

Jedna od vrlo bitnih stavki je i ekološka proizvodnja vodika. Iako je vodik vrlo održiv kao gorivo, njegova proizvodnja može biti štetna ako se ne koriste odgovarajuće metode proizvodnje. Prihvatljivost proizvodnje vodika ovisi o izvoru energije kojim se izvršava proces proizvodnje. Ako se koriste obnovljivi izvori energije kao npr. vjetroenergije ili solarna energija, onda proizvodnja vodika može biti gotovo potpuno bez emisija. Međutim, ako se koriste fosilna goriva, ekološke prednosti se uvelike smanjuju. Želja za ekološki prihvatljivom proizvodnjom iziskuje kombinaciju inovacija u tehnologiji, obnovljive izvore energije i održive pristupne tehnologije [3].

### 5.1.5. Smanjenje buke

Smanjenje buke također predstavlja jednu od značajnijih prednosti primjene vodika u zrakoplovstvu. Proces izgaranja vodika u motorima s unutarnjim izgaranjem ili gorivim ćelijama uzrokuje stvaranje puno manje buke u usporedbi s konvencionalnim motorima koji koriste fosilna goriva kao izvor energije. Ova prednost ima ključnu važnost u poboljšanju iskustva i usluge putnika, a pozitivno utječe na okoliš i radne uvjete operativnog osoblja zračne luke i zrakoplova. Tiši rad zrakoplova rezultira i manjim financijskim troškovima za izgradnju zvučnih izolacija područja oko zračne luke i ispunjenjem sve bitnijih regulatornih zahtjeva i standarda održivosti [4].

### 5.1.6. Sigurnost

Najnovija istraživanja potvrđuju da je tekući vodik sigurniji od kerozina. Novi dizajni spremnika za tekući vodik su sigurni i strukturno čvršći s manjom vjerojatnošću curenja ili pucanja. U slučaju nesreće, tekući vodik ima prednosti kao što su brza disipacija, manji intenzitet vatre i manja toplina u odnosu na tradicionalna goriva poput kerozina. Tekući vodik ne zagađuje okoliš poput kerozina i nema visokog tlaka kao plin, što smanjuje strukturne rizike. Ipak, postoji izazov detektiranja curenja vodika zbog njegove sposobnosti prodiranja kroz materijale. Sigurnosne mjere i obuka su potrebne zbog kriogenih uvjeta rukovanja tekućim vodikom. Spremnici i infrastruktura trebaju biti zaštićeni od vanjskih elemenata i osigurani od neovlaštenog pristupa. Sve u svemu, tekući vodik predstavlja sigurniju alternativu kerozinu za zrakoplove uz pravilno projektiranje, rukovanje i održavanje [46].

## 5.2. Nedostaci i izazovi kod primjene vodika u zračnom prometu

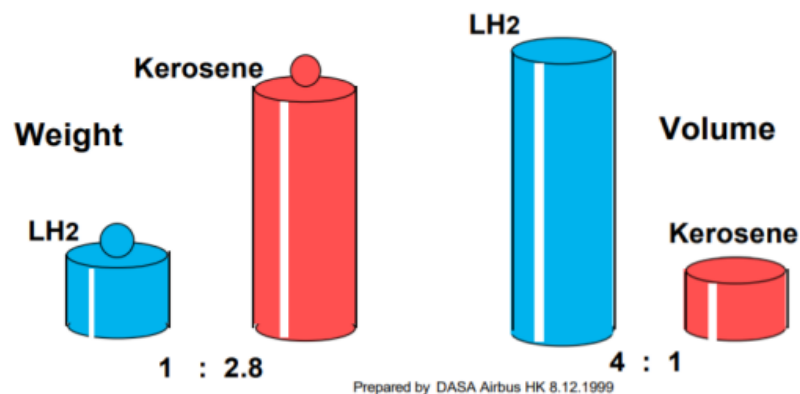
Uz navedene prednosti, implementacija vodika u zračnom prometu donosi i niz izazova. Tako postoje različiti sigurnosni, tehnički, ekonomski, ekološki i tehnološki izazovi koji su obrađeni u nastavku teksta.

### 5.2.1. Modifikacije zrakoplova

S ciljem implementacije vodika u zrakoplovnu industriju nužno je napraviti određene financijski vrlo zahtjevne preinake u odnosu na današnje zrakoplove koji koriste kerozin kao pogonsko gorivo. Sukladno tome, vodik kao gorivo predstavlja veliki izazov za inženjere kada

je riječ o zahtjevima za masom i volumenom, kao i za skladištenjem goriva u zrakoplovima. Zbog karakteristika vodika, svoje niske energetske volumne gustoće potrebni su veći spremnici za iste količine energije. To predstavlja jedan od glavnih problema pri konstrukciji zrakoplova pogonjenih na vodik. Također, kao što je već navedeno u radu tekući vodik ima puno veći potencijal u zrakoplovstvu od vodika u obliku plina iz razloga što ima puno veću volumnu gustoću energije. Međutim, da bi se pohranio u tom obliku potrebno ga je ohladiti na  $-253^{\circ}\text{C}$  što također predstavlja veliki izazov jer takav način pohrane zahtjeva posebne načine izolacije spremnika [46].

Gorive ćelije zrakoplova može pokretati komprimirani ili tekući vodik. Iako je tekući gušći i lakši sustav implementacije za njegovu primjenu je puno složeniji. Iz tih razloga neke od kompanija su odlučile koristiti komprimirani vodik koji će možda morati biti skladišteni u spremnicima izvan trupa zrakoplova. S druge strane tekući vodik ima bolje karakteristike, ali zahtjeva posebno izolirane spremnike što značajno povećava otpore zrakoplova dok se za hlađenje koristi čak 45% energije [47]. Kao što je i navedeno glavni i najveći izazov je u niskoj volumetrijskoj gustoći. Na 700 bara iznos gustoće komprimiranog vodika je  $42\text{ kg/m}^3$ , dok tekući vodik ima gustoću od  $70.8\text{ kg/m}^3$  što je skoro dvostruko više. Kerozin s druge strane ima 4 puta više energije po jedinici volumena od tekućeg vodika (slika 16) [48].



Slika 16. Usporedba razlike mase i volumena kerozina i vodika, [49]

Zrakoplovi koji koriste vodik nose veći volumen goriva u usporedbi s konvencionalnim zrakoplovima koji koriste obično gorivo. Iz tog razloga najveći problem je u velikim i teškim spremnicima vodika koji zauzimaju mnogo prostora kojega u zrakoplovima nema puno. Zbog toga zrakoplovi na vodik iziskuju neka nova rješenja i redizajn zrakoplova. Uspješan dizajn zrakoplova na vodik temelji se uglavnom na pronalaženju optimalne konfiguracije spremnika kako bi se nosile potrebne količine tekućeg vodika. Unutar industrije prepoznati su različiti prijedlozi za dizajn. Iz tih razloga mijenjaju se i dimenzije zrakoplova kako bi se mogli prilagoditi velikim integralnim spremnicima. Nadalje, zbog centra gravitacije zrakoplova i velikih težina spremnika potrebno je spremnike postavljati u trupu zrakoplova. To dovodi do

smanjenja naprezanja i momenta savijanja, ali uzrokuje povećanje krila za 37%, a samim time i povećanje mase samog zrakoplova od 6%. Dobra strana je to što se ovime povećava sigurnost zrakoplova jer su spremnici dodatno zaštićeni jakom konstrukcijom trupa [46].

Konfiguracije spremnika mogu biti neintegralne ili integralne. Neintegralne konfiguracije spremnika smještene su izvan trupa zrakoplova. Obično se montiraju na okviru, iznad ili ispod krila. Neintegralni spremnici moraju se nositi s aerodinamičkim i inercijskim opterećenjima, uz dodatno opterećenje sadržaja goriva. Nadalje, integralni spremnici se nalaze unutar trupa zrakoplova zbog čega njihov oblik ovisi o dizajnu trupa zrakoplova. Oni ne moraju podnositi aerodinamičke sile što povećava sigurnost i stabilnost zrakoplova. Ova vrsta spremnika predstavlja realniju i izvedljiviju opciju za primjenu [46].

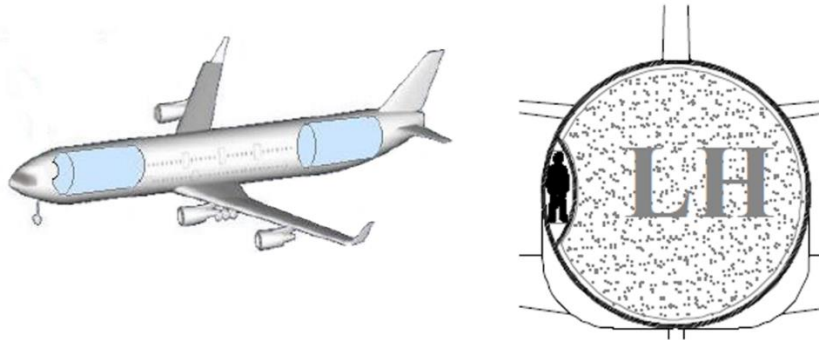
Oblik spremnika je isto tako vrlo bitan. Istraživanja su pokazala da su za ovu vrstu goriva najpogodniji cilindrični i sferni spremnici. Prednost sfernog oblika je u tome što smanjuje omjer površine i volumena, ali uzrokuju veću frontalnu površinu za isti volumen u odnosu na cilindrični oblik spremnika. Cilindrični oblik pruža veću zapremnu učinkovitost uz maksimalno korištenje prostora unutar zrakoplova. Međutim, ovakvi spremnici su izrazito nepogodni zbog nehomogenih tlačnih opterećenja goriva. Sukladno tome, najbolji dizajn bi bio kombinacija isto navedenih oblika, odnosno cilindrični spremnik s polukuglastim dizajnom [46].

Izvedbe pozicioniranja spremnika vodika unutar zrakoplova predstavlja još jedan od velikih izazova zbog čega su izvršena brojna istraživanja. Kod malih regionalnih zrakoplova gdje je promjena težine goriva mala u odnosu težinu zrakoplova može se ugraditi spremnik u stražnji dio zrakoplova što pruža najveću prednost s obzirom na metriku težine ali i predstavlja problem glede ravnoteže zrakoplova. Ovaj tip pozicioniranja spremnika prikazan je na slici 17 [50].



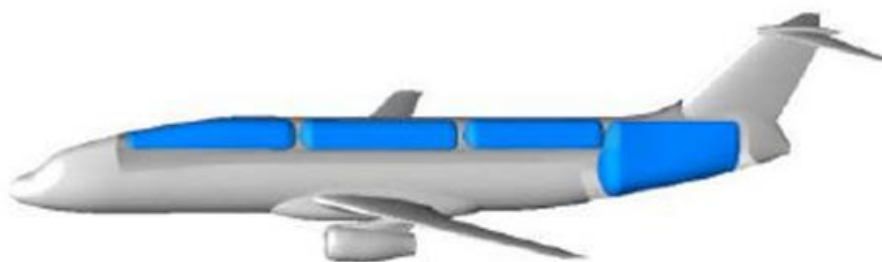
**Slika 17.** Položaj spremnika vodika kod regionalnih zrakoplova, [50]

Kako veći zrakoplovi imaju veću varijaciju težina u odnosu na ukupnu težinu zrakoplova, spremnike je potrebno postavljati unutar trupa u stražnjem i prednjem dijelu zrakoplova čime se omogućavaju varijacije centra gravitacije (*eng. Center of Gravity - CG*) unutar dozvoljenih granica zrakoplova. Problem kod ovog rasporeda je u povezanosti između kabine i kokpita. Ovaj problem bi se mogao riješiti s ugradnjom prolaza kroz spremnik vodika (slika 18) [50].



**Slika 18.** Položaj spremnika kod velikih varijacija težine, [50]

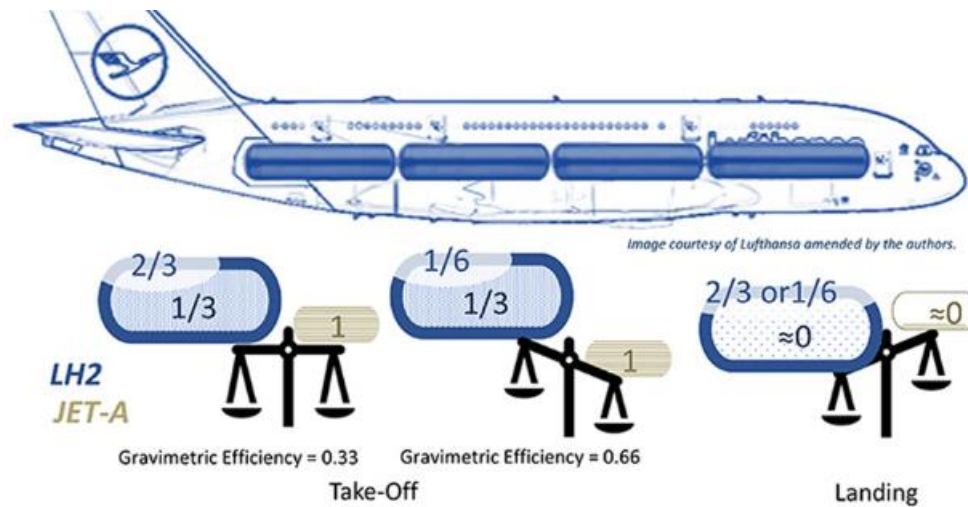
Jedna od mogućih konfiguracija spremnika je i položaj spremnika iznad putnika u kombinaciji sa spremnikom u stražnjem dijelu zrakoplova što negativno utječe na skladištenje ručne prtljage putnika (slika 19) [50].



**Slika 19.** Položaj spremnika zrakoplova kratkog/srednjeg doleta, [50]

Bez obzira na to koja se konfiguracija spremnika primjenjuje izazov uvijek ostaje isti, a to je ugradnja velikih vodikovih spremnika u zrakoplov. Nadalje, jedan od bitnih parametara je i promjer spremnika i njegov utjecaj na gravimetrijsku učinkovitost. Kod istog sadržaja energije, gravimetrijska učinkovitost od 0.66 spremnika vodika uzrokovat će težinu u

polijetanju puno lakšom, dok će težina pri slijetanju biti nešto teža u odnosu na konvencionalne zrakoplove (slika 20) [48].



Slika 20. Gravimetrijska učinkovitost vodika pri slijetanju i polijetanju, [48]

Osiguravanje glavnog sigurnosnog aspekta spremnika očituje se u izolaciji samoga spremnika tekućeg vodika. Tekući vodik je potrebno održavati na temperaturi ne većoj od  $-253^{\circ}\text{C}$  kako ne bi došlo do njegova isparavanja i povećanja volumena, što bi ugrozilo sigurnosni aspekt zrakoplova. Propuštanjem topline povećava se temperatura, dok se potrošnjom goriva smanjuje temperatura. Nužno je postići ravnotežu između ova dva fenomena odgovarajućim dizajnom spremnika. Promjer i duljina spremnika znatno utječu na učinak spremnika te se provode daljnja istraživanja na ovu temu [48]. Naime, kvalitetna izolacija omogućit će smanjiti količinu isparavanja čime se povećava učinkovitost i sigurnost leta. Poznate su tri tehnologije izolacije tekućeg vodika, to su:

- višeslojna izolacija
- vakuumska izolacija
- izolacija pjenom [46].

Osim preinaka na zrakoplovu zbog pohrane vodika i njegove izolacije, potrebno je prilagoditi i pogonske sustave. To uzrokuje i automatski redizajn vodova goriva, komore izgaranja i pomoćne pogonske jedinice. Pod valom promjena naći će se i operativne procedure kao i usluga upravljanja zračnim prometom zbog potrebe za novom tehnologijom. Upotreba tekućeg vodika iziskuje redizajn komore izgaranja s ciljem povećanja učinkovitosti. Kerozinski izgarači negativno bi utjecali na emisije i prouzročili velike količine  $\text{NO}_x$  u atmosferi zbog stvaranja nepotrebno visokih razina temperature u komori. Kao alternativa nameće se sustav suhog izravnog ubrizgavanja (*engl. Lean direct injection – LDI*) i metoda mikromiješanja. Oba koncepta imaju ulogu smanjenja velikih plamenova s ciljem smanjenja emisija  $\text{NO}_x$  [46].

### 5.2.2. Infrastrukturni zahtjevi i prilagodbe zračnih luka

Kako bi implementacija vodika bila moguća neophodna je prilagodba zračnih luka na ovu vrstu tehnologije, u protivnom neće moći prihvaćati zrakoplove pogonjene na vodik. Sve to zahtjeva uvođenje novih sustava koji će omogućiti adekvatno održavanje zrakoplova kao i njihov prihvata i otpremu. Potrebno je razviti sustave punjenja goriva, infrastrukturu za ukapljivanje vodika i razviti strategiju za skladištenje tekućeg vodika [46].

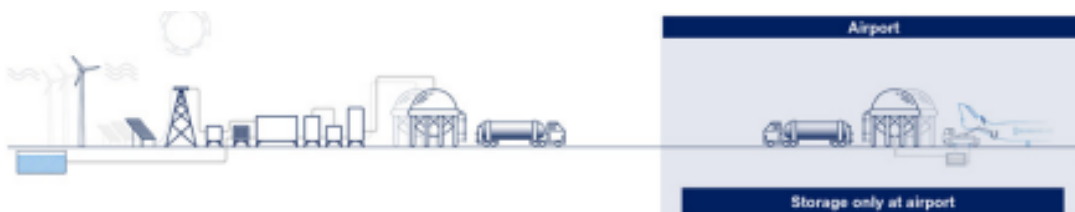
Ovisno o količini potražnje od strane zrakoplovnih operatera zračne luke će se morati odlučiti o izgradnji vlastitog proizvodnog pogona vodika ili usvojiti infrastrukturu koja će omogućiti sigurno skladištenje tekućeg vodika na zračnim lukama. Kako bi vodik postao komercijalno održiv potrebno će biti imati najmanje nekoliko zračnih luka koje će moći podržavati ovu vrstu tehnologije. S obzirom na to da se predviđa da će prvi zrakoplovi pogonjeni na vodik biti dugog dometa, velike zračne luke bi iz tog razloga trebale prve usvojiti ovu tehnologiju. Efikasniji sustavi opskrbe vodikom podrazumijevat će proizvodnju na licu mjesta. U tom slučaju treba voditi računa o aspektu sigurnosti i pravilnom određivanju lokacije spremnika vodika. Kako ne bi došlo do isparivanja vodika cjevovodi moraju imati propisanu izolaciju i tri različita sustava cijevi. Jedan namijenjen za opskrbu, drugi u svrhu sakupljanja isparenog vodika i treći sustav u slučaju kvara [46].

Izazov opskrbe i punjenja tekućim vodikom na zračnim lukama moguće je riješiti na tri načina:

- Strategija 1: vodik se proizvodi i ukapljuje izvan zračne luke te se dostavlja cisternama, odnosno cestovnim putem zračnoj luci
- Strategija 2: vodik se proizvodi izvan zračne luke, doprema plinovodom i ukapljuje na zračnoj luci
- Strategija 3: vodik se proizvodi i ukapljuje na zračnoj luci [4].

Zbog najmanjih kapitalnih troškova velika je vjerojatnost da će većina zračnih luka preferirati strategiju jedan, no rastom potražnje i brojem zrakoplova pogonjenih na vodik ova strategija neće biti najbolji izbor zbog mogućih gužvi na prometnicama i mjestima istovara, iz tog razloga dugoročno su strategije jedan i dva bolja opcija. Odabir između druge i treće strategije ovisit će o potražnji i veličini same zračne luke [4].

Prva strategija je prikazana na slici 21 i predstavlja najjednostavniju strategiju koja se bazira na isporuci tekućeg vodika cestovnim cisternama koji se istovaruje u skladišne spremnike čija veličina ovisi o potražnji. Kako ne bi došlo do isparavanja spremnici moraju biti izolirani. Održavanje kriogenih temperature je vrlo zahtjevno zbog čega se na taj process troši jako puno energije. Ova strategija nije idealna za velike i srednje zračne luke jer bi velik broj cisterni izazvao velike gužve i ne efikasnu provedbu procesa na zračnoj strani zračne luke [4].



**Slika 21.** Prikaz strategije 1, vodik se proizvodi i ukapljuje izvan zračne luke te se dostavlja cisternama, odnosno cestovnim putem zračnoj luci,[4]

Druga strategija (slika 22) predstavlja prikladnu opciju kod povećanja potražnje za vodikom jer je u takvim situacijama potrebno primijeniti druge načine transporta vodika kako bi se smanjio pritisak na lokalne ceste i zračne luke. U ovom slučaju cisterne bi se zamijenile sustavom cjevovoda koji bi dostavljao plinoviti vodik do zračnih luka. Međutim, budući da zrakoplovi zahtijevaju tekući vodik, plinoviti vodik mora biti pretvoren u tekući oblik u postrojenju za ukapljivanje prije same pohrane. Prijenos putem cjevovoda najučinkovitiji je način za premještanje velikih količina plinovitog vodika. To može omogućiti transport plinovitog vodika pod različitim tlakovima i miješanjem s prirodnim plinom u različitim udjelima zbog čega je ova opcija najidealnija na većim udaljenostima. Ova strategija najefikasnija je za srednje i velike zračne luke. Implementacija zahtjeva značajna financijska početna sredstva za izgradnju samo cjevovoda, no postoji mogućnost i korištenja cjevovoda za prirodni plin koja možda neće biti prikladna za korisnike s velikom potražnjom vodika [4].



**Slika 22.** Prikaz strategije 2, vodik se proizvodi izvan zračne luke, doprema plinovodom i ukapljuje na zračnoj luci, [4]

Slika 23 prikazuje strategiju 3. Smatra se da ova strategija neće biti održiva za zračne luke jer zahtjeva ogromne količine električne energije koja je potrebna za elektrolizu vode i ukapljivanje. Ova strategija predviđa proizvodnju vodika na zračnoj luci procesom elektrolize što iziskuje električne vodove velike snage i upravo iz tog razloga male su šanse da će ova strategija zaživjeti kod zračnih luka [4].





**Slika 23.** Prikaz strategije 3, vodik se proizvodi i ukapljuje na zračnoj luci, [4]

Osim transporta vodika do zračnih luka potrebno je i omogućiti transport vodika do zrakoplova. Postoje dvije najoptimalnije opcije, a to je prijevoz cisternama ili hidrantski podzemni sustavi. Kao što je to slučaj i kod strategija, na početku će se preferirati prijevoz cisternama zbog prihvatljivijih financijskih troškova, a s vremenom će prelazak na hidrantske sustave biti nužan zbog zagušenja na zračnim lukama [4].

Zbog specifičnih karakteristika tekućeg vodika, budući zrakoplovi pogonjeni na vodik će biti veći od današnjih konvencionalnih zbog čega će zahtijevati veće površine prilikom taksiranja na manevarskim površinama i parkiranja na stajanku zrakoplova. Sve to će izazvati nove izazove zračnim luka u smislu modificiranja postojećih površina i proširenju kapaciteta za što su potrebna i dodatna financijska ulaganja koja su neophodna kako bi se zadovoljili svi kriteriji i regulatorne obveze s ciljem omogućavanja odvijanja sigurnog prometa zrakoplova na zračnim lukama.

## 6. PRIMJERI PRIMJENE VODIKA KOD ZRAKOPLOVA I ZRAČNIH LUKA

Ovo poglavlje prikazuje pregled trenutnih primjera implementacije tehnologije vodika kod zračnih luka i zrakoplova koji su provedeni s ciljem postepene dekarbonizacije zračnog prometa.

### 6.1 Primjeri zračnih luka

Posljednjih godina, kao rezultat mnogobrojnih istraživanja i studija neke od zračnih luka pokrenule su prve korake prema uvođenju vodika u svoje poslovanje. Sve to s ciljem smanjenja emisija štetnih plinova. Primjena vodika kao goriva nije ograničena samo na zračne luke, već podrazumijeva i različite aspekte zemaljskih operacija unutar zračnih luka. Jedan od ključnih aktera u ovom procesu je Airbus, vodeći proizvođač zrakoplova, koji je usko povezan s mnogim zračnim lukama u ostvarivanju njihovih ciljeva dekarbonizacije što samo po sebi dokazuje ozbiljnost prema rješavanju problema emisija štetnih plinova od strane svih sudionika zračnog prometa. Neke od zračnih luka poduzimaju i mjere kojima omogućavaju u bliskoj budućnosti održivi prihvat zrakoplova koji su pogonjeni na vodik. Nastavak rada donosi pregled zračnih luka koje su na neki način uvele tehnologiju vodika u svoje poslovanje.

#### 6.1.1. Zračne luke Rotterdam i Hamburg

Zbog europskih poticaja i odluka (Francuska) da putnici za kraće relacije koriste željeznički prijevoz umjesto zračnog što predstavlja udarac zračnom prometu, neke od zračnih luka su se odlučile udružiti kako bi mogle omogućiti kraće letove na električni i vodikov pogon. Dana 21. lipnja 2023. godine, zračna luka Hamburg i zračna luka Rotterdam The Hague (slika 24), zajedno s organizacijom Hamburg Aviation potpisali su memorandum o razumijevanju. Glavni cilj ovog sporazuma je istraživanje mogućnosti implementacije zračnog prijevoza pomoću vodika kao goriva između gradova Hamburga i Rotterdama. U okviru ovog sporazuma, strane će usko surađivati na različitim aspektima, uključujući razvoj potrebne infrastrukture, proizvodnju obnovljive energije, obuku osoblja te implementaciju pametnih tehnologija u zračnim lukama. Svi ovi koraci imaju za cilj omogućiti početak komercijalnih letova koristeći vodik kao gorivo već do 2026. godine. Ova suradnja predstavlja jednu od prvih suradnji ovakve vrste u Europi koja potiče primjenu vodika zbog čega je od velikog značaja za ovu vrstu tehnologije [51].

Hamburg i Rotterdam imaju površinski dvije najveće luke u Europi zbog čega imaju potencijali za ovom tehnologijom. Problem se javlja u činjenici da su ova dva grada na vrlo

maloj udaljenosti (415 km) što se protivi politici Europe gdje se forsira upotreba željeznice na relacijama manjim od 600 km. Bez obzira na to nastojanja u zračnom sektoru su Jasna, ovom suradnjom želi se potaknuti i postići održivost navedenih zračnih luka i ubrzati energetska tranzicija u zrakoplovstvu čime bi se prvi let na vodik mogao izvesti već za nekoliko godina [51].



**Slika 24.** Satelitski prikaz zračne luke Rotterdam The Hague (s lijeva) i zračne luke Hamburg (s desna), [52]

#### 6.1.2. Zračne luke Le Bourget, Orly i Charles De Gaulle – Pariz, Francuska

Jedan od važnih projekata koji pospješuje razvoju vodikove tehnologije je i potpisano partnerstvo između Groupe ADP, odnosno vlasnika pariških zračnih luka i globalni igrač u zračnom prometu s vodećim imenima u zrakoplovstvu bez ugljika - Pipistrel, VoltAero, Universal Hydrogen, ZeroAvia, BeyondAero i Daher. Ovo partnerstvo je sklopljeno 21. Lipnja 2023. godine s ciljem bržeg uvođenja električnih i vodikovih zrakoplova na pariškim zračnim lukama Le Bourget, Orly i Charles de Gaulle (slika 25) prije 2030. Partneri će zajednički raditi na zamjeni postojećih letova, identificiranju potrebnih resursa i infrastrukture te surađivati s regulatornim tijelima [51].

Ovi zrakoplovi će imati kapacitet od 2-100 sjedala i bit će posebno dizajnirani za kraće rute u Europi. Groupe ADP poduzima konkretne korake kako bi podržao ovu inicijativu, uključujući postavljanje električnih punionica na zračnim lukama, testiranje akustičnih svojstava zrakoplova te istraživanje logistike i sigurnosti vodikovih kapsula [51].

Groupe ADP također radi na testiranju mogućnosti opskrbe tekućim ili plinovitim vodikom na zračnoj luci Paris-Le Bourget te planira zamijeniti više od 15% zrakoplova na istoj luci. Također su identificirali zračnu luku Toussus-le-Noble kao testno središte za električne zrakoplove. Ovo partnerstvo predstavlja ključni korak prema održivijoj budućnosti zrakoplovstva u Parizu i šire [51].



**Slika 25.** Satelitski prikaz zračne luke Charles de Gaulle, [52]

### 6.1.3. Zračna luka Teessied, Ujedinjeno kraljevstvo

Međunarodna zračna luka Teesside (slika 26) koja se nalazi na sjeveroistoku Ujedinjenog Kraljevstva će uz podršku od 8 milijuna funti državnih sredstava implementirati vozila s vodikovim pogonom i infrastrukturu za punjenje vodikom. Cilj je razviti vozila poput kamiona za vuču aviona i čistača piste na vodikov pogon, dok se planira i razvoj infrastrukture za punjenje vodikom kako bi podržale različita vozila, uključujući teretna vozila i vozila na zračnoj ploči [53].

Ova inicijativa je usmjerena na smanjenje emisija ugljika i ostvarenje cilja Net Zero do 2030. godine. Vlada ističe da tehnologija vodika ima potencijal za dekarbonizaciju prometa te će investicija potaknuti ekonomski rast, stvaranje radnih mjesta i usavršavanje radne snage. Osim toga, planirano je ulaganje od 300.000 funti u fakultete u regiji kako bi se podržalo obrazovanje i razvoj vještina lokalne radne snage. Ovim istraživanjima i financijskim ulaganjima će ova zračna luka postati prva britanska zračna luka koja koristi vodik kao sredstvo pogona [53].



Slika 26. Satelitski prikaz zračne luke Teesside, [52]

#### 6.1.4. Zračna luka Glasgow

Zračna luka Glasgow (slika 27) zajedno s partnerom za savjetovanje Net Zero, Ikigai, uspješno je osigurala sredstva škotske vlade za istraživanje izvedivosti stvaranja centra za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vodika, s ciljem podrške letovima bez emisija u zračnoj luci. Ovaj projekt, će istražiti optimalna rješenja za ekološku proizvodnju i skladištenje vodika te razmotriti praktičnu provedivost vodikovog sustava u zračnoj luci [54].

Konzorcij koji sudjeluje u projektu uključuje različite stručnjake i organizacije poput H2GO Power za tehnologiju pohrane podataka, ZeroAvia za vodikov-električni pogon zrakoplova, Ricardo za savjetovanje o okolišu i inženjering, te druge partnere. Planirano je da projekt bude završen do početka 2024. godine, a dugoročna vizija uključuje proširenje koncepta na druge regionalne zračne luke u Velikoj Britaniji kako bi se stvorila mreža zračnih luka spremnih za vodik, uključujući Aberdeen i Southampton zajedno s Glasgowom [54].



Slika 27. Satelitski prikaz zračne luke Glasgow, [52]

#### 6.1.5. Zračna luka Brisbane

Dana 8. Lipnja 2023. godine osnovana je organizacija Hydrogen Flight Alliance (HFA) u zračnoj luci Brisbane, koji okuplja ključne igrače australskog zrakoplovstva i industrije zelenog vodika. Savez ima za cilj postaviti Australiju u vodeću ulogu pri prelasku zrakoplovne industrije na neto nula emisija do 2050. godine. Početni naglasak je na uspostavljanju prvog australskog komercijalnog leta na vodikov pogon bez emisija između Brisbanea i Gladstonea 2026. godine, s kapacitetom zrakoplova od 15 sjedala [55].

Hydrogen Flight Alliance okuplja više ključnih organizacija, a cilj saveza je ostvariti ekološku transformaciju zračnog prometa kroz ispitivanje potencijala zelenog vodika i razvoj infrastrukture za vodikove letove. Projekt ima i veći kontekst, budući da Queensland planira da Olimpijske i Paraolimpijske igre 2032. godine budu klimatski neutralne, a HFA želi doprinijeti ovom cilju omogućujući letove bez emisija tijekom ovih događaja [55].

Australija, s obiljem obnovljive energije i rastućom industrijom zelenog vodika, vidi se kao povoljno mjesto za testiranje letova na vodik. Formiranje HFA-e omogućuje suradnju stručnjaka iz različitih područja kako bi se razriješili izazovi povezani s vodikom u zrakoplovstvu. Ovaj savez stvara centar inovacija u oblasti čiste tehnologije u Queenslandu, doprinoseći stvaranju radnih mjesta i razvoju emisijama neutralnih zrakoplova [55]. Slika 28 prikazuje zračnu luku Glasgow.



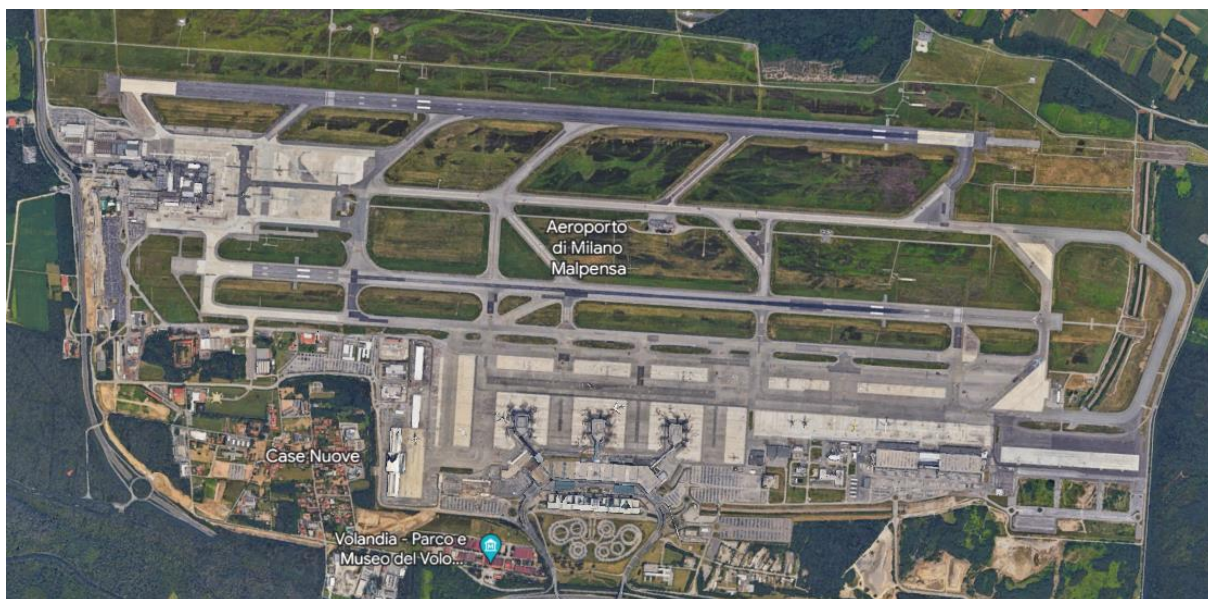
**Slika 28.** Satelitski prikaz zračne luke Brisbane, [52]

#### 6.1.6. Zračna luka Milano Malpensa, Italija

Snam, vodeća energetska infrastrukturna tvrtka, se udružila sa SEA-om (tvrtkom koja upravlja zračnim lukama) i milanskim zračnim lukama kako bi uveli zeleni vodik u zračnu luku Malpensa. Ovaj projekt označava prvi put u Italiji da se vodik uvodi u zračnu luku i dio je inicijative za dekarbonizaciju koju je pokrenuo Snam [56].

Planiraju izgraditi postrojenje za opskrbu vozila koji se koriste za zemaljske usluge u zračnoj luci Malpensa zelenim vodikom proizvedenim iz obnovljivih izvora. Infrastruktura će uključivati elektrolizer, kompresor, sustav za pohranu i isporuku vodika. Projekt će se financirati s 1,1 milijun eura, a ključni cilj je stvoriti zeleni centar opskrbe vodikom za unutarnju logistiku zračne luke i vanjski transport [56].

SEA je također uključena u druge inicijative za smanjenje emisija, uključujući zamjenu vozila električnim vozilima, privlačenje investitora u napredne flote i stvaranje infrastrukture za vodik za letove na vodik do 2035. godine. Ova inicijativa doprinosi naporima za rješavanje problema klimatskih promjena i same održivosti [56]. Na slici 29 nalazi se prikaz zračne luke Milano Malpensa.



Slika 29. Satelitski prikaz zračne luke Milano Malpensa, [52]

#### 6.1.7. Međunarodna zračna luka Edmonton, Kanada

Međunarodna zračna luka Edmonton (slika 30) je sklopila suradnju s tvrtkom Toyota Kanada s ciljem implementacije 100 vozila na vodikove gorive ćelije. To će doprinijeti smanjenju emisija CO<sub>2</sub> i doprinijeti ostvarenju cilja da se do 2040. godine ostvari nulta emisija ugljičnog dioksida. Primjena ovih vozila zahtjeva i potrebu za razvojem infrastrukture, zbog toga vodstvo zračne luke nastavlja razvijati strategiju najefikasnije opskrbe čistog vodika proizvedenog u Alberti. S tim ciljem sklopljena je suradnja s tvrtkom Air Products koji slovi za najvećeg svjetskog proizvođača vodika. Ovaj projekt ključan je za dekarbonizaciju i energetska tranziciju u ovom dijelu svijeta koji ulaže velike napore u razvoj ove tehnologije što se očituje i u projektu izgradnje trajne infrastrukture vodika [57].

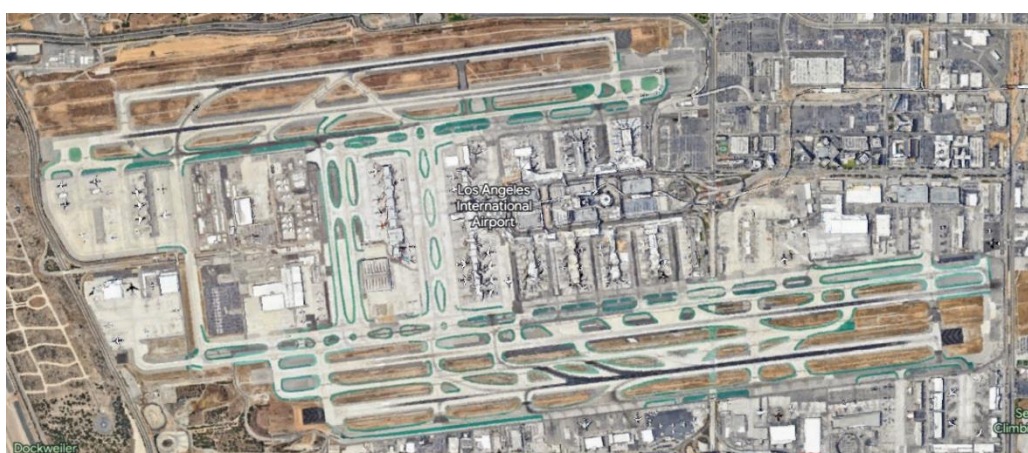




Slika 30. Satelitski prikaz zračne luke Edmonton, [52]

#### 6.1.8 Međunarodna zračna luka Los Angeles, Sjedinjene Američke Države

Zračna luka Los Angeles (slika 31) predstavlja prvu zračnu luku koja je izgradila prvu stanicu za proizvodnju vodika na zračnoj luci. Zbog toga je i dobila nagradu za ekološku promidžbu i postignuća. Stanica je veličine 10.500 četvornih stopa a vodik se proizvodi u samoj stanici putem elektrolize vode uz pomoć električne energije. Iz procesa elektrolize se dobiva kisik koji se ispušta u atmosferu dok se vodik komprimira i pohranjuje u spremnike iz kojih se ispušta u vozila. Ovaj projekt je dio inicijative čiji je cilj izvršiti dekarbonizaciju zračnog sektora i povećati održivost zračnih luka [58].



Slika 31. Satelitski prikaz zračne luke Los Angeles, [52]

### 6.1.9. Zračna luka Manchester

Zračna luka Manchester (slika 32) je veličinom treća zračna luka u Ujedinjenom Kraljevstvu, ali vodeća u provođenju procesa dekarbonizacije i uvođenja tehnologije vodika. Planira se izgradnja cjevovoda koji će obilježiti ovu zračnu luku kao prvu u UK koja će omogućiti direktnu opskrbu zrakoplova vodikom do sredine 2030-ih. Potpisan je i memorandum o razumijevanju čija je svrha izgradnja i povezivanje zračne luke s cjevovodom te isporuka vodika u zračni promet u što kraćem roku. Također, potpisnici ovog memoranduma će zajedničkim snagama raditi na istraživanju budućih potražnja vodika te analizirati mogućnost povezivanja regionalne mreže sa zračnom lukom Manchester [59].



**Slika 32.** Satelitski prikaz zračne luke Manchester, [52]

### 6.2. Primjeri zrakoplova

Sve više se ulaže u istraživanja i razvoj zrakoplova koji su pogonjeni na vodik zbog težnje za smanjenjem emisija štetnih tvari. U daljnjem tekstu navedeni su zrakoplovi ili njihovi projekti koji u potpunosti ili u kombinaciji s drugim izvorima energije koriste tehnologiju vodika za pogon. Neki od njih su proizvedeni dok je većina njih još uvijek u fazi razvoja.

### 6.2.1. Airbus ZEROe projekt

Airbus ima velike ambicije glede primjene vodikove tehnologije. Naime, cilj je proizvesti prvi komercijalni zrakoplov koji je pogonjen vodikom do 2035. godine. Ovaj projekt predstavlja inovativni pristup zrakoplovne tvrtke Airbus razvoju ekološki prihvatljivih zrakoplova. Ova inicijativa fokusira se na stvaranje zrakoplova koji koriste nove tehnologije pogona kako bi smanjili emisije štetnih plinova i doprinijeli održivijem zračnom prijevozu [60].

Pod brendom ZEROe, Airbus je predstavio nekoliko koncepta zrakoplova koji koriste vodik kao ključni element za pogon. Ti koncepti uključuju:

- ZEROe Turbofan – srednji dolet
- ZEROe Turboprop – kratki dolet
- ZEROe Blended-Wing Body (BWB), (slika 24) – srednji do dugi dolet [60].

ZEROe koncepti zrakoplova su i dalje u fazi razvoja i istraživanja, a da bi se mogli pretvoriti u stvarne zrakoplove bit će potrebno savladati i dalje veliki broj izazova.



Slika 33. Izgled koncepta zrakoplova BWB, [60]

### 6.2.2. Boeing bespilotna teretna letjelica - CAV

Boeing je predstavio koncept bespilotnog zrakoplova CAV (eng. *Boeing Unmanned Cargo Air Vehicle*) koji koristi tehnologiju vodika za napajanje elektromotora. Ovaj koncept ima potencijal za prijevoz tereta na kraćim udaljenostima. Izvršeno je uspješno testiranje ove letjelice koja ne leti vertikalno više od 120 metara i ne u daljem dometu od jedne milje. Može prenositi do 225 kilograma tereta. CAV predstavlja modernu tehnologiju čija je svrha pružati alternativu današnjim načinima prijevoza na kraćim udaljenostima. Specifičnost ove

bespilotne letjelice je u njenim dimenzijama, široka je 6 metara i ima masu od 450 kilograma. Letenje se odvija putem autonomnih sustava i uz pomoć napredne tehnologije senzora i umjetne inteligencije. Ovaj projekt predstavljen je 2018. godine nakon čega su izvršena uspješna mnogobrojna testiranja već do kraja 2019. godine a koja se nastavljaju i danas s ciljem dodatnog unaprjeđenja i povećanja mogućnosti ove letjelice [61].

Slika 24 prikazuje izgled bespilotne letjelice – CAV.



**Slika 34.** Izgled bespilotne letjelice - CAV, [61]

### 6.2.3. E – Fan X projekt

E- Fan X je projekt koji je zaslužan za postavljanje temelja Airbusove politike postizanja dekarbonizacije zračnog sektora. U njegovom provođenju sudjelovalo je više tvrtki, a to je Airbus, Rolls-Royce i Siemens. Projekt se bazirao na stvaranju sustava koji bi kombinirao različite tipove pogonske tehnologije, tako su se istraživale i integracije gorivnih ćelija na vodik u konvencionalne zrakoplove. Testni zrakoplov predstavljen je 2017. godine s ciljem razvoja naprednih alternativnih tehnologija. Plan je bio zamijeniti jedan od 4 motora testnog zrakoplova s električnim motorom snage 2 MW. U svega tri godine projekt je ispunio sva tri glavna cilja projekta. Prvi je bio uspješno testiranje hibridnog sustava na testnom zrakoplovu čime se potvrdio potencijali ove tehnologije. Drugi je bio steći nova znanja koja će doprinijeti razvoju daljnje implementacije ovoga sustava, i zadnji je postaviti temelje u smislu regulatornih zahtjeva za buduće zrakoplove koji će biti pogonjeni na alternativnu energiju. Nažalost, E-Fan X Project je prekinut i više se ne nastavlja. Airbus je obznanio prekid projekta 2020. godine iz ekonomskih razloga i zbog promjena prioriteta. Unatoč tome, projekt je doprinio razvoju i razumijevanju tehnologije hibridnog električnog pogona u zrakoplovstvu, što je ključno za nastavak istraživanja održivijih alternativa u budućnosti [62].

#### 6.2.4. Zrakoplov De Havilland Dash 8-300, Universal Hydrogen

Američka tvrtka Universal Hydrogen postigla je u travnju 2023. godine veliki povijesni uspjeh razvojem i uspješnim testiranjem zrakoplova koji koristi pogon na gorive ćelije vodika. Zrakoplov je namijenjen za regionalne letove s kapacitetom kabine za 40 putnika (slika 25). Na testiranju zrakoplov je dosegao visinu od 3.500 MSL (*eng. Mean sea Level - MSL*) dok je trajanje leta iznosilo 15 minuta. Vrhunac projekta se očekuje 2025. godine kada bi se u putničku službu trebao plasirati zrakoplov ATR 72 koji će biti modificiran i prilagođen radu na vodik. Testni zrakoplov Dash 8-300 nije proizveden od nule nego je postojećem zrakoplovu ugrađen naknadni komplet za primjenu na vodik. Tako jedan od dva motora zamijenjen električnim motorom na gorive ćelije dok je drugi zbog sigurnosnih razloga ostao standardni turbinski. Prednost kod ovog pogonskog sustava zrakoplova je u tome što nema korištenja baterija već gorivne ćelije direktno pokreću pogonsku električnu jedinicu čime se smanjuje težina zrakoplova i sama ulaganja. Još jedna od posebnosti ovog motora je i u tome što sadrži posebno dizajnirani propeler koji osigurava potisak zrakoplova u trenutku kada je drugi konvencionalni turbinski motor ugašen kako bi se dokazalo da je let isključivo na gorive ćelije moguć. Osim toga, velika prednost je i u smanjenju buke i vibracija ovog tipa motora u odnosu na konvencionalne. Zbog svih navedenih prednosti Universal Hydrogen ima plan omogućiti komercijalne putničke letove nulte emisije do 2025. godine, dok bi za teretni promet to ipak bilo nešto kasnije [63].



**Slika 35.** Prikaz testnog zrakoplova Dash 8-300 na prvom testiranju, [63]

#### 6.2.5. Prototip zrakoplova ZA600, ZeroAvia

Britanska tvrtka ZeroAvia je uspješno završila kampanju testiranja letova svog zrakoplova koji koristi vodikov pogon, što predstavlja veliki pomak ka ostvarivanju letova nultih emisija. Tijekom kampanje obavljeno je 10 letova bez ikakvih komplikacija, čiji je dugoročni cilj postići prvi komercijalni let nulte emisije. Testiranja su se odvijala na

zrakoplovu ZA600 na zračnoj luci Cotswold u Velikoj Britaniji (slika 26). ZeroAvia je provela intenzivno testiranje svog modificiranog motora tijekom šest mjeseci. Tijekom ovih letova, zrakoplov je letio na visini od 5.000 stopa, podvrgnut je testovima izdržljivosti trajanja do 23 minute, izložen je širokom temperaturnom rasponu i postigao je maksimalno dopuštenu brzinu prema odobrenju civilne avijacije Velike Britanije. Tvrtka je potvrdila da je njihova tehnologija gorivnih ćelija i električnog pogona ispunila ili nadmašila očekivanja, s vodikovim motorom koji pruža snagu ekvivalentnu konvencionalnom motoru [64].



**Slika 36.** Izgled zrakoplova ZA600, [64]

## 7. ZAKLJUČAK

Problem klimatskih promjena i onečišćenja okoliša postaje sve veći izazov današnjice. Razvojem zračnog prometa i povećanjem broja letova potreba za novim prihvatljivijim alternativnim izvorima energije je sve veća. Primarni je cilj smanjiti emisije CO<sub>2</sub> u zrakoplovstvu koje se upotrebom kerozina najviše proizvode. Iz tog razloga tehnologija vodika predstavlja veliki potencijal jer vodik ima jako dobre karakteristike kojima se može postići nulta emisija CO<sub>2</sub>. Međutim, velika financijska ulaganja su potrebna da bi se ostvarila energetska tranzicija i prijelaz na tehnologiju vodika kao i na sve ostale vrste alternativnih goriva. Uz to, jedan od bitnih faktora koji otežava bržu i jednostavniju implementaciju vodika je i niska cijena fosilnih goriva koja bi se ipak s vremenom trebala približiti cijeni tekućeg vodika čime bi se drastično povećala konkurentnost tehnologije vodika. Velik broj zračnih luka je već počeo primjenjivati neke i od drugih izvora obnovljive energije, među kojima najviše prednjači solarna energija, vjetroenergija i električna energija. Također, primjenjuju se i zrakoplovi pogonjeni obnovljivim izvorima energije. Najčešće se tu radi o zrakoplovima manjeg kapaciteta koji su pogonjeni različitim biogorivima.

Tehnologija vodika je prepoznata kao perspektivna tehnologija na temelju koje se postavljaju nacionalni i svjetski energetske i klimatski ciljevi. Sukladno tome, vodeće svjetske organizacije i velik broj država na globalnoj i europskoj razini među kojima je i Hrvatska donose različite dokumente i strategije čime se na globalnoj, europskoj i nacionalnoj razini potiče uporaba ove vrste tehnologije s kojom je cilj ostvariti process dekarbonizacije u zračnom prometu.

Dugi povijesni razvoj tehnologije vodika, koji seže neočekivano daleko u prošlost postavio je temelj za današnju primjenu. Počevši od otkrića vodika i elektrolize, tehnologija je evoluirala. Tako danas imamo sve veći broj država, kompanija i institucija koje ulažu velike količine financijskog kapitala s ciljem razvoja zrakoplova na vodik koji će poslužiti kao temelj za razvoj budućih komercijalnih zrakoplova. Ovaj napredak je ključan u suočavanju s globalnim izazovom klimatskih promjena i povećanja ekološke održivosti zračnog prometa.

Međutim, dosadašnja istraživanja također su naglasila neka ograničenja i poteškoće primjene vodika kao alternativnog goriva. Proizvodnja, pohrana i distribucija vodika zahtijevaju znatne tehničke i infrastrukturne prilagodbe. Također, cijena vodika kao goriva trenutno je viša u usporedbi s konvencionalnim opcijama, što može predstavljati financijski izazov za zračne prijevoznike.

No, kada se osvrnemo prema budućnosti ove tehnologije, postoje ohrabrujući znakovi. Neprestane inovacije u proizvodnji vodika putem obnovljivih izvora energije, kao i napredak u razvoju učinkovitijih sistema za pohranu i distribuciju, sugeriraju da će se tehnologija vodika s vremenom sve više razvijati i postajati ekonomičnija. Uvođenje regulatornih poticaja i podrška vladinih agencija također mogu ubrzati usvajanje ove tehnologije u zračnom

prometu. Sada već veliki broj zračnih luka ulaže u istraživanja i razvoj ne samo tehnologije vodika nego i drugih alternativnih energija. Što budi optimizam i govori o ozbiljnosti problema u kojem se današnji svijet nalazi.

Kako se tehnologija vodika bude dalje razvijala, uzrokovat će značajno smanjenje emisija stakleničkih plinova i ovisnosti o fosilnim gorivima u zračnom prometu. No, važno je naglasiti da će uspješna integracija vodika zahtijevati sveobuhvatan pristup i zalaganje svih sudionika zrakoplovnog sektora. Dosadašnja istraživanja pružaju osnovu za optimizam, ali ostaje izazov osigurati da se buduće inicijative temelje na održivim praksama i doprinesu stvaranju ekološki prihvatljivijeg zračnog prometa.



## POPIS LITERATURE

1. Europska komisija. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*. Bruxelles; 2020. Preuzeto s: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&rid=1> [Pristupljeno: 26. lipnja 2023.]
2. Britannica. *Hydrogen*. Preuzeto s: <https://www.britannica.com/science/hydrogen> [Pristupljeno: 27. lipnja 2023.]
3. Kovač A. *Uloga vodika u energetskej tranziciji*. Zagreb; 2021. Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/file/393459> [Pristupljeno: 28. lipnja 2023.]
4. Postma-Kurlanc A, Leadbetter H, Pickard C. *Hydrogen Infrastructure and Operations*. London: Aerospace Technology Institute; 2022. Preuzeto s: <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-CST-POS-0035-Airports-Airlines-Airspace-Operations-and-Hydrogen-Infrastructure.pdf> [Pristupljeno: 28. lipnja 2023.]
5. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja. *Nacrt prijedloga Hrvatske strategije za vodik od 2021. Do 2050. Godine*. Zagreb; 2022. Preuzeo s: <https://esavjetovanja.gov.hr/Econ/MainScreen?EntityId=19706> [Pristupljeno: 14. srpnja 2023.]
6. Markotić T. *Usporedba razvoja tehnologija zelenog vodika*. Završni rad. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek; 2022. Preuzeto s: [file:///C:/Users/ijovic1/Downloads/tomislav\\_markotic.pdf](file:///C:/Users/ijovic1/Downloads/tomislav_markotic.pdf) [Pristupljeno: 14. srpnja 2023.]
7. Zemobility. *Vodik je nova nafta*. Preuzeto s: <https://www.zemobility.hr/4755/Vodik-je-nova-nafta> [Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]
8. Webber H, Job S. *Realising zero-carbon emission flight*. UK; 2021. Preuzeto s: [https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2021/10/FZ\\_0\\_6.1-Primary-Energy-Source-Comparison-and-Selection-FINAL-230921.pdf](https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2021/10/FZ_0_6.1-Primary-Energy-Source-Comparison-and-Selection-FINAL-230921.pdf) [Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]
9. Roland Berger. *Electric flight just over the horizon*. Preuzeto s: <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Global-Topics/Electric-Propulsion/> [Pristupljeno: 4. srpnja 2023.]

10. Jose Eduardo Mautone Barros. *General Aviation 2025 – A supercomputer with wing.* USA; 2018. Preuzeto s: <file:///C:/Users/jjovic1/Downloads/GeneralAviation2025ReneNardi.pdf> [Pristupljeno: 4. srpnja 2023.]
11. Airbus. *E-Fan X.* Preuzeto s: <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hybrid-and-electric-flight/e-fan-x> [Pristupljeno: 5. srpnja 2023.]
12. IATA. *Sustainable Aviation Fuels Fact Sheet.* Preuzeto s: <https://www.iata.org/contentassets/ed476ad1a80f4ec7949204e0d9e34a7f/fact-sheet-alternative-fuels.pdf> [Pristupljeno: 5. srpnja 2023.]
13. ICAO. *Renewable Energy for Aviation: practical applications to achieve Carbon reductions and cost savings.* 2017. Preuzeto s: [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO\\_UNDP\\_GEF\\_RenewableEnergyGuidance.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO_UNDP_GEF_RenewableEnergyGuidance.pdf) [Pristupljeno: 6. srpnja 2023.]
14. Andersen M. *Opotunities and risks of seaweed biofuels in aviation.* Oslo; 2017. Preuzeto s: [https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2017/03/OPPORTUNITIES-AND-RISKS-OF-SEAWEED-BIOFUELS-IN-AVIATION-web\\_print-1.pdf](https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2017/03/OPPORTUNITIES-AND-RISKS-OF-SEAWEED-BIOFUELS-IN-AVIATION-web_print-1.pdf) [Pristupljeno: 6. srpnja 2023.]
15. Reuters. *From green slime to jet fuel: algae offers airlines a cleaner future.* Preuzeto s: <https://www.reuters.com/article/us-airbus-germany-biofuels-idUSKCN0Z117F> [Pristupljeno: 12. srpnja 2023.]
16. Semantic scholar. *Solar Aircraft: Future need.* Preuzeto s: <https://www.semanticscholar.org/paper/SOLAR-AIRCRAFT-%3A-FUTURE-NEED-Prof-Mehta-Yadav/569c28302294ba1cb611bfe8432a22dd27aa7571?p2df> [Pristupljeno: 12. srpnja 2023.]
17. Solar impulse foundation. *Around the world in a solar airplane.* Preuzeto s: <https://aroundtheworld.solarimpulse.com/adventure> [Pristupljeno: 1. srpnja 2023.]
18. Aerospace technology. *Solar Impulse HB-SIA Solar Airplane.* Preuzeto s: <https://www.aerospace-technology.com/projects/solar-impluse/> [Pristupljeno: 1. srpnja 2023.]

19. Robb Report. *Meet the Falcon Solar, the Sun-Powered Airplane Concept That Looks Like Something Out of a Marvel Flick*. Preuzeto s: <https://robbreport.com/motors/aviation/solar-aircraft-bird-of-prey-1234679464/> [Pristupljeno: 1. srpnja 2023.]
20. Aviation Benefits beyond Borders. *Power from the sun*. Preuzeto s: <https://aviationbenefits.org/case-studies/power-from-the-sun/> [Pristupljeno: 4. srpnja 2023.]
21. Airsight. *Wind Energy and Aviation*. Preuzeto s: <https://www.airsight.de/projects/item/wind-energy-and-aviation/> [Pristupljeno: 4. srpnja 2023.]
22. Todd C. Dawson. *Revitalization of Nuclear Powered Flight*. USA; 2016. Preuzeto s: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1031576.pdf> [Pristupljeno: 4. srpnja 2023.]
23. Povijest prava istina. *Nesreća cepelina Hindenburg – smrt zračnog kolosa*. Preuzeto s: <https://povpravaistina.wordpress.com/2020/04/23/nesreca-cepelina-hindenburg-smrt-zracnog-kolosa/> [Pristupljeno: 4. srpnja 2023.]
24. Simple Flying. *How The Martin B-57B Made Hydrogen-Powered Flights In The 1950s*. Preuzeto s: <https://simpleflying.com/martin-b-57b-hydrogen-powered-flights-1950s/> [Pristupljeno: 4. srpnja 2023.]
25. Ben Brelje. *Hydrogen-powered aviation part 1: a history*. Preuzeto s: <https://brelje.net/blog/hydrogen-powered-aviation-part-one-history/> [Pristupljeno: 5. srpnja 2023.]
26. Russkiiy Mir. *Tu-155 the first Hydrogen-powered plane created in the USSR*. Preuzeto s: <https://ruskiiymir.ru/en/publications/311196/> [Pristupljeno: 5. srpnja 2023.]
27. Kallo J. *Antares DLR-H2*. Stuttgart. Preuzeto s: [https://www.dlr.de/tt/en/Portaldata/41/Resources/dokumente/ec/Antares-DinA5-V6\\_E\\_WEB.pdf](https://www.dlr.de/tt/en/Portaldata/41/Resources/dokumente/ec/Antares-DinA5-V6_E_WEB.pdf) [Pristupljeno: 5. srpnja 2023.]
28. Flugzeug-Lexikon. *Antares DLR-H2: Das weltweit erste Flugzeug mit Brennstoffzellenantrieb, welches völlig CO2-frei fliegt*. Preuzeto s: [https://www.flugzeug-lexikon.de/ILA\\_2010/Sportflugzeuge/Antares\\_DLR-H2\\_Brennstoffzellenflugzeug/antares\\_dlr-h2\\_brennstoffzellenflugzeug.html](https://www.flugzeug-lexikon.de/ILA_2010/Sportflugzeuge/Antares_DLR-H2_Brennstoffzellenflugzeug/antares_dlr-h2_brennstoffzellenflugzeug.html) [Pristupljeno: 9. srpnja 2023.]

29. ETN news. *H2FLY's HY4, H2-electric passenger aircraft sets a 7,000 ft altitude record.* Preuzeto s: <https://etn.news/buzz/h2fly-s-hy4-h2-electric-passenger-aircraft-sets-7-000-ft-altitude-record> [Pristupljeno: 9. srpnja 2023.]
30. ITIF. *Climate-Tech to Watch: Hydrogen-Powered Aviation.* Preuzeto s: <https://itif.org/publications/2023/02/21/climate-tech-to-watch-hydrogen-powered-aviation/> [Pristupljeno: 11. srpnja 2023.]
31. IATA. *CORSIA Fact sheet.* Preuzeto s: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---corsia/> [Pristupljeno: 11. srpnja 2023.]
32. ICAO. *2022 Environmental Report.* 2022. Preuzeto s: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ICAO%20ENV%20Report%202022%20F4.pdf> [Pristupljeno: 14. srpnja 2023.]
33. ICAO. *Resolution Adopted by the Assembly.* Montreal; 2016. Preuzeto s: [https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/Resolutions/a39\\_res\\_prov\\_en.pdf](https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/Resolutions/a39_res_prov_en.pdf) [Pristupljeno: 13. srpnja 2023.]
34. Pavić-Rogošić L. *Globalni ciljevi održivog razvoja do 2030.* Zagreb: ODRAZ- Održivi razvoj zajednice; 2015. Preuzeto s: [https://www.odraz.hr/wp-content/uploads/2020/10/globalni-ciljevi-odrzivog-razvoja-do-2030\\_web.pdf](https://www.odraz.hr/wp-content/uploads/2020/10/globalni-ciljevi-odrzivog-razvoja-do-2030_web.pdf) [Pristupljeno: 14. srpnja 2023.]
35. Europski parlament. *Zeleni plan: ključ klimatski neutralnog i održivog EU-a.* Preuzeto s: [https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20200618STO81513/zeleni-plan-kljuc-klimatski-neutralnog-i-odrzivog-eu-a?&at\\_campaign=20234-Green&at\\_medium=Google Ads&at\\_platform=Search&at\\_creation=RSA&at\\_goal=TR\\_G&at\\_audience=europski%20zeleni%20plan&at\\_topic=Green Deal&at\\_location=HR&gclid=CjwKCAjww7KmBhAyEiwA5-PUSrPhRdGDiEseHdtuc9rmBPw8S3ZVj4HDvTfJCDiGvvvY1r060UEDXBoCisMQAvD\\_BwE](https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20200618STO81513/zeleni-plan-kljuc-klimatski-neutralnog-i-odrzivog-eu-a?&at_campaign=20234-Green&at_medium=Google Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=europski%20zeleni%20plan&at_topic=Green Deal&at_location=HR&gclid=CjwKCAjww7KmBhAyEiwA5-PUSrPhRdGDiEseHdtuc9rmBPw8S3ZVj4HDvTfJCDiGvvvY1r060UEDXBoCisMQAvD_BwE) [Pristupljeno: 14. srpnja 2023.]
36. Europski parlament. *IZVJEŠĆE o strategiji zrakoplovstva za Europu.* Preuzeto s: [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2017-0021\\_HR.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2017-0021_HR.html) [Pristupljeno: 14. srpnja 2023.]

37. Rated power. *The European Hydrogen Strategy: What you need to know*. Preuzeto s: <https://ratedpower.com/blog/european-hydrogen-strategy/> [Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]
38. European Union. *NextGenerationEU*. Preuzeto s: [https://next-generation-eu.europa.eu/index\\_en](https://next-generation-eu.europa.eu/index_en) [Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]
39. Clean Aviation. *Programme overview and structure*. Preuzeto s: <https://www.clean-aviation.eu/programme-overview-and-structure> [Pristupljeno: 16. Srpnja 2023.]
40. Europska Unija. *Clean Sky 10th Anniversary*. UK; 2018. Preuzeto s: <https://www.nottingham.ac.uk/engineering/documents/clean-sky-10th-anniversary-2008-2018.pdf> [Pristupljeno: 14. srpnja 2023.]
41. Hrvatski sabor. *Strategija energetskeg razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu*. Zagreb: Narodne novine; 2020. Preuzeto s: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_03\\_25\\_602.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_25_602.html) [Pristupljeno: 15. srpnja 2023.]
42. Hrvatski sabor. *Nacionalna razvojna strategija Republike Hrvatske do 2030. godine*. Zagreb: Narodne novine; 2021. Preuzeto s: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021\\_02\\_13\\_230.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_02_13_230.html) [Pristupljeno: 26. srpnja 2023.]
43. Hrvatski sabor. *Hrvatska strategija za vodik do 2050. Godine*. Zagreb: Narodne novine; 2022. Preuzeto s: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022\\_03\\_40\\_492.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_03_40_492.html) [Pristupljeno: 26. srpnja 2023.]
44. Vlada republike Hrvatske. *Nacionalni plan oporavka i otpornosti 2021. - 2026*. Zagreb; 2021. Preuzeto s: <https://vlada.gov.hr/UserDocsImages/Vijesti/2021/srpanj/29%20srpnja/Plan%20oporavka%20i%20otpornosti%2C%20srpanj%202021..pdf> [Pristupljeno: 27. srpnja 2023.]
45. Europska Unija. *Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*. 2020. Preuzeto s: [https://www.euractiv.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/06/20200507\\_Hydrogen-Powered-Aviation-report\\_FINAL-web-ID-8706035.pdf](https://www.euractiv.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/06/20200507_Hydrogen-Powered-Aviation-report_FINAL-web-ID-8706035.pdf) [Pristupljeno: 27. srpnja 2023.]
46. Rondinelli S, Sabatini R, Gardi A. *Challenges and Benefits offered by Liquid Hydrogen Fuels in Commercial Aviation*. Australia; 2014. Preuzeto s:

<file:///C:/Users/jjovic1/Downloads/PRCC2014-LiquidHydrogenFuel26.11.2014.pdf>

[Pristupljeno: 27. srpnja 2023.]

47. ENGIE Research & Innovation. *Hydrogen-Powered Aircraft: Challenges Of Taking H2 Into The Sky*. Preuzeto s: <https://innovation.engie.com/en/news/news/green-mobility/hydrogen-powered-aircraft-challenges/22584> [Pristupljeno: 28. srpnja 2023.]
48. Huete J, Pilidis P. *Parametric study on tank integration for hydrogen civil aviation propulsion*. 2021. Preuzeto s: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921034418> [Pristupljeno: 28. srpnja 2023.]
49. Scholz D, Dib L. *Hydrogen as Future Fuel Used in Minimum Change Derivatives of the Airbus A321*. Hamburg; 2015. Preuzeto s: [https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030\\_PRE\\_DLRK2015\\_HydrogenA320\\_2015-09-22.pdf](https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030_PRE_DLRK2015_HydrogenA320_2015-09-22.pdf) [Pristupljeno: 28. srpnja 2023.]
50. Leeham News and Analysis. Bjorn's Corner: *The challenges of Hydrogen. Part 6. Tank placement*. Preuzeto s: <https://leehamnews.com/2020/08/28/bjorns-corner-the-challenges-of-hydrogen-part-6-tank-placement/> [Pristupljeno: 23. kolovoza 2023.]
51. CAPA. *Sustainability shift – two airports combine to aid introduction of hydrogen and electric aircraft*. Preuzeto s: <https://centreforaviation.com/analysis/reports/sustainability-shift-two-airports-combine-to-aid-introduction-of-hydrogen-and-electric-aircraft-652755> [Pristupljeno: 19. Srpnja 2023.]
52. Google Earth. Preuzeto s: <https://earth.google.com/> [Pristupljeno: 28. kolovoza 2023.]
53. H2 view. *Teesside International Airport to introduce hydrogen with £8m of UK funding*. Preuzeto s: <https://www.h2-view.com/story/teesside-international-airport-to-introduce-hydrogen-with-8m-of-uk-funding/> [Pristupljeno: 19. kolovoza 2023.]
54. Airposrt World. *Glasgow Airport led consortium achieves funding for hydrogen feasibility study*. Preuzeto s: <https://airport-world.com/funding-approved-for-hydrogen-feasibility-study-at-glasgow-airport/> [Pristupljeno: 20. kolovoza 2023.]

55. Airport World. *Brisbane Airport helps launch Hydrogen Flight Alliance*. Preuzeto s: <https://airport-world.com/brisbane-airport-helps-launch-hydrogen-flight-alliance/> [Pristupljeno: 22. kolovoza 2023.]
56. International Airport Review. *SEA, Milan airports, and Snam launch green hydrogen at Malpensa Airport*. Preuzeto s: <https://www.internationalairportreview.com/news/171233/sea-milan-airports-and-snam-launch-green-hydrogen-at-malpensa-airport/> [Pristupljeno: 20. kolovoza 2023.]
57. Cision. *Toyota Canada and Edmonton International Airport (YEG) Partner to Bring 100 Zero-Emission Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles to Alberta Roadways*. Preuzeto s: <https://www.newswire.ca/news-releases/toyota-canada-and-edmonton-international-airport-yeg-partner-to-bring-100-zero-emission-hydrogen-fuel-cell-electric-vehicles-to-alberta-roadways-883385827.html> [Pristupljeno: 20. kolovoza 2023.]
58. GreenBiz. *LAX Lauded for First Large-Airport Hydrogen Fueling Station*. Preuzeto s: <https://www.greenbiz.com/article/lax-lauded-first-large-airport-hydrogen-fueling-station> [Pristupljeno: 22. kolovoza 2023.]
59. Mag Manchester Airport. *Manchester Airport on track to be first in UK with direct hydrogen fuel pipeline, thanks to landmark partnership with HyNet*. Preuzeto s: <https://mediacentre.manchesterairport.co.uk/manchester-airport-on-track-to-be-first-in-uk-with-direct-hydrogen-fuel-pipeline-thanks-to-landmark-partnership-with-hynet/> [Pristupljeno: 21. kolovoza 2023.]
60. Airbus. *The ZEROe demonstrator has arrived*. Preuzeto s: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-02-the-zeroe-demonstrator-has-arrived> [Pristupljeno: 21. kolovoza 2023.]
61. Boeing. *Get a load of this!* Preuzeto s: <https://www.boeing.com/features/highlights/2020/cargo-air-vehicle/index.page> [Pristupljeno: 23. kolovoza 2023.]
62. Airbus. *E-Fan X*. Preuzeto s: <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hybrid-and-electric-flight/e-fan-x> [Pristupljeno: 20. Kolovoza 2023.]
63. Hartzell Propeller. *Hydrogen-powered flight makes major headway: Universal Hydrogen marks milestone first flight*. Preuzeto s: <https://hartzellprop.com/hydrogen-powered-flight-hartzell-propeller/> [Pristupljeno: 23. kolovoza 2023.]

64. Edie. *ZeroAvia welcomes successful zero-emission hydrogen aircraft testing*. Preuzeto s: <https://www.edie.net/zeroavia-welcomes-successful-zero-emission-hydrogen-aircraft-testing/> [Pristupljeno: 23. kolovoza 2023.



## POPIS KRATICA

|        |   |
|--------|---|
| SMR    | <i>(Steam methane reforming)</i> Parno reformiranje metana  |
| AD     | Anaerobna digestija   |
| OIE    | Obnovljivi izvori energije  |
| SAF    | Održivo gorivo za zrakoplove  |
| NEPA   | <i>(Nuclear Energy Propulsion of Aircraft)</i> Zrakoplov pogonjen nuklearnom energijom  |
| NACA   | <i>(National Advisory Committee for Aeronautics)</i> Nacionalni savjetodavni odbor za aeronautiku   |
| DLR    | <i>(German Aerospace Center)</i> Njemački svemirski centar  |
| IEA    | <i>(International Energy Agency)</i> Međunarodna agencija za energiju   |
| ICAO   | <i>(International Civil Aviation Organization)</i> Međunarodna organizacija za civilno zrakoplovstvo  |
| NPOO   | Nacionalni plan oporavka i otpornosti   |
| SC     | Strateški cilj  |
| CORSIA | <i>(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)</i> Program za neutralizaciju i smanjenje emisija ugljika za međunarodno zrakoplovstvo |
| IATA   | <i>(International Air Transport Association)</i> Međunarodna udruga za zračni prijevoz  |
| PEMFC  | <i>(Proton Exchange Membrane Fuel Cells)</i> Gorivi članak s polimernom membranom kao elektrolitom  |
| CG     | Centar gravitacije  |
| LDI    | <i>(Lean direct injection)</i> Suho direktno ubrizgavanje   |
| BWB    | <i>(Blended-Wing Body)</i> Zrakoplov kombiniranih krila   |
| CAV    | <i>(Boeing Unmanned Cargo Air Vehicle)</i> Boeingova bespilotna teretna letjelica   |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| <b>Slika 1.</b> Prikaz sheme vodikovog lanca vrijednosti od proizvodnje do korištenja, [15] .....  | 5  |
| <b>Slika 2.</b> Proizvodnja zelenog vodika, [5] .....  | 6  |
| <b>Slika 3.</b> Podjela vodika po bojama, [6] .....  | 7  |
| <b>Slika 4.</b> Prikaz gustoće energije različitih nositelja energije, [7] .....   | 9  |
| <b>Slika 5.</b> Krajnji korisnici vodika, [5] .....  | 10 |
| <b>Slika 6.</b> Prikaz zrakoplova projekta E Fan X, [11] .....   | 12 |
| <b>Slika 7.</b> Ciklus ugljika biomase, [13] .....   | 13 |
| <b>Slika 8.</b> Zrakoplov HB-SIA, [18] .....   | 15 |
| <b>Slika 9.</b> Izgled letjelice Solar Falcon, [19] .....  | 15 |
| <b>Slika 10.</b> Prikaz zračnih luka koje koriste solarnu energiju, [20] .....   | 16 |
| <b>Slika 11.</b> Zrakoplov Martin B-57 Canberra, [24] .....  | 19 |
| <b>Slika 12.</b> Tlocrt, bokocrt i nacrt zrakoplova CL-400 Suntan, [25] .....  | 20 |
| <b>Slika 13.</b> Zrakoplov Tu-155, [26] .....  | 21 |
| <b>Slika 14.</b> Izgled kabine Antaresa DLR H2, [28] .....   | 23 |
| <b>Slika 15.</b> Zrakoplov DLR HY4, [29] .....   | 24 |
| <b>Slika 16.</b> Usporedba razlike mase i volumena kerozina i vodika, [49] .....   | 36 |
| <b>Slika 17.</b> Položaj spremnika vodika kod regionalnih zrakoplova, [50] .....   | 37 |
| <b>Slika 18.</b> Položaj spremnika kod velikih varijacija težine, [50] .....   | 38 |
| <b>Slika 19.</b> Položaj spremnika zrakoplova kratkog/srednjeg doleta, [50] .....  | 38 |
| <b>Slika 20.</b> Gravimetrijska učinkovitost vodika pri slijetanju i polijetanju, [48] .....   | 39 |
| <b>Slika 21.</b> Prikaz strategije 1, vodik se proizvodi i ukapljuje izvan zračne luke te se dostavlja cisternama, odnosno cestovnim putem zračnoj luci, [4] ..... | 41 |
| <b>Slika 22.</b> Prikaz strategije 2, vodik se proizvodi izvan zračne luke, doprema plinovodom i ukapljuje na zračnoj luci, [4] .....                              | 41 |
| <b>Slika 23.</b> Prikaz strategije 3, vodik se proizvodi i ukapljuje na zračnoj luci, [4] .....  | 42 |
| <b>Slika 24.</b> Satelitski prikaz zračne luke Rotterdam The Hague (s lijeva) i zračne luke Hamburg (s desna), [52] .....  | 44 |
| <b>Slika 25.</b> Satelitski prikaz zračne luke Charles de Gaulle, [52] .....   | 45 |
| <b>Slika 26.</b> Satelitski prikaz zračne luke Teesside, [52] .....  | 46 |
| <b>Slika 27.</b> Satelitski prikaz zračne luke Glasgow, [52] .....   | 47 |
| <b>Slika 28.</b> Satelitski prikaz zračne luke Brisbane, [52] .....  | 48 |
| <b>Slika 29.</b> Satelitski prikaz zračne luke Milano Malpensa, [52] .....   | 49 |
| <b>Slika 30.</b> Satelitski prikaz zračne luke Edmonton, [52] .....  | 50 |
| <b>Slika 31.</b> Satelitski prikaz zračne luke Los Angeles, [52] .....   | 50 |
| <b>Slika 32.</b> Satelitski prikaz zračne luke Manchester, [52] .....  | 51 |
| <b>Slika 33.</b> Izgled koncepta zrakoplova BWB, [60] .....  | 52 |
| <b>Slika 34.</b> Izgled bespilotne letjelice - CAV, [61] .....   | 53 |
| <b>Slika 35.</b> Prikaz testnog zrakoplova Dash 8-300 na prvom testiranju, [63] .....  | 54 |

**Slika 36.** Izgled zrakoplova ZA600, [64]..... 55

## POPIS TABLICA

|   |   |
|---|---|
| <b>Tablica 1.</b> Usporedba značajki vodika sa značajkama benzina i prirodnoga plina..... | 4 |
| <b>Tablica 2.</b> Usporedba karakteristika kerozina (Jet a-1) i tekućeg vodika.....       | 4 |

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  
(vrsta rada)

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 Utjecaj primjene vodika kao alternativnog goriva na održivi razvoj zračnog prometa, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

U Zagrebu, 28. kolovoza 2023. godine

Student/ica: \_\_\_\_\_  
Filip Čurić,  
(ime i prezime, potpis)