

Primjena alternativnih izvora energije u funkciji održivog razvoja zračnog prometa

Markovinović, Krešimir

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:667675>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**PRIMJENA ALTERNATIVNIH IZVORA ENERGIJE U FUNKCIJI
ODRŽIVOG RAZVOJA ZRAČNOG PROMETA**

**IMPLEMENTATION OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES IN THE
FUNCTION OF SUSTAINABLE AIR TRAFFIC DEVELOPMENT**

Mentor: doc. dr. sc. Igor Štimac

Student: Krešimir Markovinović
JMBAG: 2405121011

Zagreb, travanj 2024.

Zagreb, 29. ožujka 2023.

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

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7146

Pristupnik: **Krešimir Markovinović (2405121011)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Primjena alternativnih izvora energije u funkciji održivog razvoja zračnog prometa**

Opis zadatka:

U radu je potrebno definirati na koji način zračni promet utječe na okoliš, kategorizirati glavne zagađivače te opisati izvore zagađenja prema svakom dioniku. Uz navedeno, potrebno je navesti regulatorni okvir u dijelu gdje zračni promet utječe na zagađenje okoliša. Nadalje, potrebno je detaljnije opisati koja se konvencionalna goriva koriste u zračnom prometu te vrste zagađenja koja proizlaze iz njih. U cilju komparacije ekološki prihvatljivih alternativnih goriva, potrebo je opisati koje sve vrste alternativnih goriva se mogu koristiti u zračnom prometu te napraviti detaljniju usporedbu pozitivnih i negativnih elemenata konvencionalnog i alternativnog goriva. Na kraju rada, potrebno je prikazati korištenje alternativnog goriva u području zračnoga prometa na nekoj studiji slučaja.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

doc. dr. sc. Igor Štimac

Jelena Pivac, mag. ing. traff. (komentor)

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Klimatske promjene predstavljaju sve veći svjetski problem. S ciljem smanjenja emisija plinova i ostalih štetnih čimbenika, zrakoplovna industrija se okreće alternativnim izvorima energije. Postoje mnogobrojne inicijative, propisi i dokumenti koji služe kao smjernice i okviri za istraživanje i razvoj. Alternativni izvori goriva koji obećavaju su održiva zrakoplovna goriva, vodik i električna energija. Danas postoji znatan broj zračnih luka koje nude održiva zrakoplovna goriva, ali ona su skupa za proizvodnju. Vodik kao alternativno gorivo, bi mogao imati značajnu ulogu jer je dostupan u velikim količinama i ne stvara štetne emisije plinova. Električna energija i baterije također predstavljaju sve veće zanimanje, a osim što ne generiraju emisije, dugoročno nude i veću uštedu. Bez obzira što već postoje primjeri korištenja alternativnih izvora energije, pred zrakoplovnom industrijom su brojni izazovi prije nego komercijalni zrakoplovi krenu na duže relacije.

KLJUČNE RIJEČI: emisije; alternativna goriva; vodik; izazovi

SUMMARY AND KEY WORDS

Climate change is a growing global problem. With the aim of reducing gas emissions and other factors, the aviation industry is turning to alternative sources of energy. There are various initiatives, regulations and documents that serve as guidelines and frameworks for research and development. Alternative energy sources that are promising are sustainable aviation fuels, hydrogen and electricity. Today, there are a considerable number of airports that offer sustainable aviation fuels, but they are expensive to produce. Hydrogen could have a significant role as an alternative fuel, since it doesn't create any gas emission and is available in large scale. Electricity and batteries also have increasing interest, and in addition to not generating any emissions, they also offer greater savings in the long run. Although there are already examples of the use of alternative energy sources, the aviation industry faces numerous challenges before commercial planes can take off on long-haul flights.

KEY WORDS: emissions; alternative fuels; hydrogen; challenges

Sadržaj

1. UVOD	1
2. UTJECAJ ZRAKOPLOVNE INDUSTRIJE NA EKOLOGIJU	3
2.1. Zagađenje okoline bukom	3
2.2. Zagađenje otpadom.....	6
2.3. Zagađenje zraka	8
3. PREGLED ALTERNATIVNIH GORIVA I POPRATNE INFRASTRUKTURE	11
3.1. Održiva zrakoplovna goriva	12
3.2. Vodik kao gorivo.....	17
3.2.1. Metode proizvodnje vodika.....	18
3.2.2. Opskrba vodikom i infrastruktura zračnih luka.....	18
3.3. Električna energija	21
3.3.1. Električni zrakoplovni pogonski sustavi	21
3.3.2. Baterije – izvori napajanja.....	22
3.3.3. Infrastruktura	23
4. KOMPARATIVNA ANALIZA PRIMJENE ALTERNATIVNIH I KONVENCIONALNIH IZVORA ENERGIJE	26
4.1. Održiva zrakoplovna goriva	26
4.2. Vodik.....	26
4.3. Električna energija i baterije.....	28
5. PRIMJENA ALTERNATIVNIH GORIVA U INDUSTRIJI ZRAČNOG PROMETA	31
5.1. Primjena održivih zrakoplovnih goriva	31
5.2. Primjena vodika	32
5.3. Primjena električne energije u zračnom prometu	34
6. ZAKLJUČAK	38
POPIS LITERATURE.....	40
POPIS KRATICA.....	45
POPIS SLIKA	48
POPIS TABLICA	49

1. UVOD

U današnje doba sve je više pozornosti usmjereno na ekološku učinkovitost i utjecaj koji prometna industrija kao jedna od najvećih zagađivača zraka putem ispušnih plinova, a između ostalog i zrakoplovna industrija ostavljaju na ekologiju. Zrakoplovna industrija ima veliki utjecaj na okoliš, emitira ispušne plinove, zagađuje okolinu bukom i otpadnim materijalima, onečišćuje zemlju i utječe na kvalitetu zraka. Kako je zrakoplov jedan od najpopularnijih prijevoznih sredstava, a s ciljem smanjenja negativnog učinka na okoliš, alternativna goriva u zračnom prometu imaju ključnu ulogu u postizanju održivog razvoja.

Alternativna goriva imaju u cilju dekarbonizirati zračnu industriju, a glavni fokus je postizanje neto nulte emisije do 2050. godine. Razne opcije alternativnih goriva, poput održivih zrakoplovnih goriva, vodika ili električne energije se već istražuju i razvijaju. Razvoj alternativnih goriva i postizanje strateških ciljeva smanjenja emisija prate mnoge svjetske, europske i lokalne inicijative i propisi.

Cilj ovog završnog rada je prikazati moguće opcije alternativnih goriva, njihove prednosti i izazove s kojima se zračna industrija susreće. Naslov završnog rada je: Primjena alternativnih izvora energije u funkciji održivog razvoja zračnog prometa, te je podijeljen u šest dijelova:

1. Uvod
2. Utjecaj zrakoplovne industrije na ekologiju
3. Pregled alternativnih goriva i popratne infrastrukture
4. Komparativna analiza primjene alternativnih i konvencionalnih izvora energije
5. Primjena alternativnih goriva u industriji zračnog prometa
6. Zaključak

U prvom poglavlju ukratko je opisan rad, dan je osvrt na poglavlja i tematiku koja se obrađuje.

U drugom poglavlju je opisan utjecaj zrakoplovne industrije na ekologiju. Objašnjeno je zagađenje bukom, zagađenje otpadom i zagađenje zraka. Zadnji dio ovog poglavlja daje osvrt na područja i mogućnostima poboljšanja razine zaštite okoliša.

Treće poglavlje detaljno obrađuje alternativna goriva koja se već koriste i istražuju: održiva zrakoplovna goriva, vodik i električnu energiju, te potrebnu infrastrukturu za implementaciju istih.

Alternativna goriva koja se obrađuju u radu, u četvrtom se poglavlju uspoređuju s konvencionalnim izvorom energije. Detaljno su objašnjene prednosti alternativnih goriva u odnosu na konvencionalne izvore, ali i trenutni izazovi s kojima se suočava cijela zrakoplovna industrija kada je riječ o alternativnim izvorima.

Peto poglavlje daje osvrt i primjere alternativnih goriva u zračnom prometu do danas i planove za budućnost.

U posljednjem, šestom poglavlju su izneseni zaključci na temelju ranije izložene materije.

2. UTJECAJ ZRAKOPLOVNE INDUSTRIJE NA EKOLOGIJU

U zadnjih nekoliko godina, ekološka učinkovitost zrakoplovne industrije je u središtu pozornosti, zajedno sa izazovima s kojima se suočava. Kao i ostale industrije, ova industrija ima veliki i značajan utjecaj na okoliš, čiji su glavni ekološki kriteriji [1]:

- buka,
- emisija ispušnih plinova iz zrakoplovnih motora,
- klimatske promjene i kvaliteta zraka,
- manipulacija otpadnim materijalom,
- onečišćenje zemlje i vode na zračnim lukama.

U zrakoplovnoj industriji zagađenje okoliša rezultat je raznih dionika, poput [2]:

- Zrakoplova i vozila za prihvat i otpremu zrakoplova, njihove proizvodnje i održavanja – emisije stakleničkih plinova (ugljikov (IV) oksid – CO₂) i nečiste tvari (dušikovi oksidi – NO_x i čestice) stvaraju se izgaranjem goriva unutar motora.
- Zračnih luka i infrastrukture – glavni onečišćivači su vozila na tlu, zrakoplovi prilikom slijetanja i polijetanja, ali i izgradnja i održavanje zračnih luka, putničkih terminala i uzletno-sletnih staza.
- Putnika i tereta, kontrole leta, navigacije i upravljanja zračnim prostorom.

Prema Izvješću o okolišu Agencije Europske unije za sigurnost zračnog prometa (engl. *European Union Aviation Safety Agency – EASA*) iz 2022. godine, broj letova u zračnim lukama (zemlje Europske Unije – EU 27 + zemlje Europskog udruženja za slobodnu trgovinu, engl. *European Free Trade Association – EFTA*) povećao se, u razdoblju od 2005. do 2019. godine za 15% (na 9,3 milijuna), dok su se putnički kilometri udvostručili (+90%). Zbog COVID-19 pandemije, emisije su se u 2020. godini smanjile za više od 50%, za oko 65% je smanjena i izloženost buci, te se ujedno u 2021. godini broj letova smanjio na 5,1 milijuna [3].

2.1. Zagađenje okoline bukom

Buka zrakoplova ključna je briga zajednice na koje utječu zrakoplovne operacije. Unatoč uvođenju manje bučnih zrakoplova, postoje dokazi koji prikazuju da sve veći broj ljudi smetaju niže razine buke nego u prošlosti (54 dB u odnosu na 57 dB iz 1982. godine) [4].

Krajem 60-ih godina prošlog stoljeća, problem buke u zračnom prometu eskalirao je kao ekološki aspekt te je potaknuo brojna znanstvena istraživanja i studije s ciljem smanjenja štetnog utjecaja na okoliš. Na vijeću Organizacije međunarodnog civilnog zrakoplovstva (engl. *International Civil Aviation Organisation – ICAO*) 1971. godine proizašle su preporuke, to jest temeljni dokument za regulaciju problematike buke „Annex 16 ICAO *Environmental Protection*“ (hrv. zaštita okoliša), unutar kojeg postoji klasifikacija i certifikati o stupnjevima buke koju stvaraju pojedini mlazni motori, te su zrakoplovi svrstani u nekoliko kategorija [1]:

- Engl. *Non-Noise Certificated* (NNC) – zrakoplovi koji nisu pokriveni ICAO Annex 16, to jest prva generacija mlaznih zrakoplova kojima je zabranjeno operiranje od 1990.

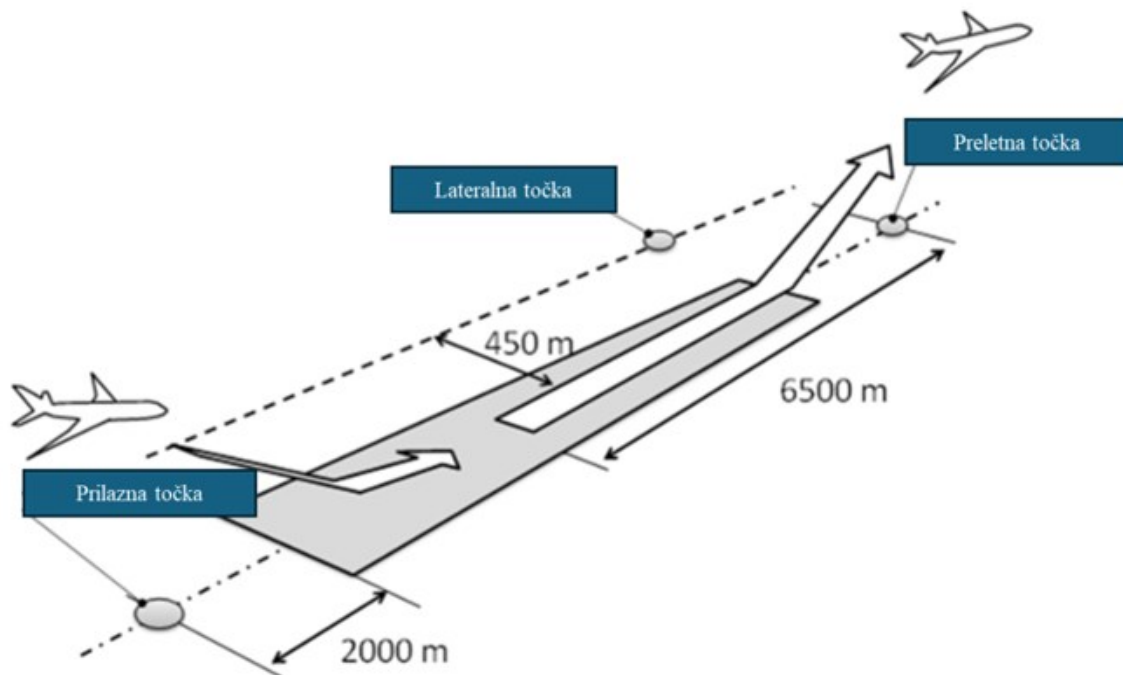
godine. Ovoj kategoriji pripadaju primjerice zrakoplovi stare generacije Douglas DC-8 i Boeing 707 [2].

- Engl. *Chapter 2* – zrakoplovi koji su podnijeli zahtjev za certificiranje prije 6. listopada 1977. godine. Primjer zrakoplova ove kategorije uključuje: Boeing 727 i Douglas DC-9s [2].
- Engl. *Chapter 3* – zrakoplovi koji su certificirani nakon 6. listopada 1977. godine. Primjer: Boeing 737-300, Boeing 737-400, Boeing 737-500, Airbus 319 [2].
- Engl. *Chapter 4* – zrakoplovi certificirani iza 1. siječnja 2006. – Airbus 380, Airbus A320NEO, A350XWB, Boeing 737NG, Boeing 787 [2].
- Engl. *Chapter 14* – svi zrakoplovi iznad pedeset i pet tona moraju biti najmanje 7 dB tiši od *Chapter 4* standarada iz 2017. godine [2].

Primarna svrha certificiranja zrakoplova od buke je osigurati da je najnovija dostupna tehnologija za smanjenje buke ugrađena u dizajn zrakoplova, te da se to pokazuje postupcima koji su relevantni za svakodnevne operacije [5].

Kako zrakoplovi proizvode najveću buku kod uzlijetanja i slijetanja, a s ciljem da se ujednači mjerenje jačine buke pri certificiranju zrakoplova, ICAO je propisao standardne uvjete i referentne točke u blizini uzletno-sletne staze, prema kojima se utvrđuje razina buke pri slijetanju i uzlijetanju (prikazano na slici 1) [1]:

- Točka A (preletna točka) – u ovoj točki se mjeri razina buke pri uzlijetanju, a točka se nalazi na produženoj središnjici uzletno-sletne staze (USS), 6500 m od početka zaleta pri polijetanju.
- Točka B (prilazna točka) – razina buke se u ovoj točki mjeri pri slijetanju, a točka se nalazi na produženoj crti USS-a, 2000 m ispred praga USS-e.
- Točka C (lateralna točka) – razina buke je najveća za vrijeme uzlijetanja, a točka se nalazi na paralelnoj središnjici USS-e, udaljena od središnjice 650 m.



Slika 1. Točke mjerenja buke

Izvor: [6]

S ciljem smanjenja štetnih učinaka buke, Svjetska zdravstvena organizacija Europe preporučuje smanjenje razine buke zrakoplova ispod L_{den} 45 dB (indikator buke za dan-večer-noć) i L_{night} 40 dB (indikator noćne buke). Tijekom 2019. godine, 3,2 milijuna ljudi, u devedeset i osam europskih zračnih luka, bilo je izloženo razini buke L_{den} 55 dB, dok je u više od pedeset dnevnih događaja u kojima je buka zrakoplova prelazila 70 dB bilo izloženo 1,3 milijuna ljudi [7].

Buka iz zrakoplova javnozdravstveni je problem, te može utjecati na pamćenje i učenje kod djece, poremetiti san i uzrokovati ozbiljne dugotrajne zdravstvene probleme, poput kardiovaskularnih bolesti, rizika od moždanog udara, utjecaja na mentalno zdravlje, povećanja stresa i tjeskobe [4].

Pod pritiskom javnosti, zračne luke su uvodile dodatne mjere za smanjenje negativnog utjecaja buke na okoliš kao što je uvođenje postupaka u prilazu i odletu, uvođenje putanja iznad manje naseljenih ili nenaseljenih područja, ograničenje prihvata bučnih zrakoplova i zatvaranje aerodroma za promet noću, zoniranje prostora u okolici aerodroma, zvučne izolacija kuća ili zgrada, preseljavanje i slične metode. S obzirom da su zrakoplovi novih generacija sve tiši, prema *Chapter 14*, očekuje se da će se smanjiti broj ljudi pogođenih značajnom bukom zrakoplova, a može se i zaključiti da je negativan utjecaj buke na okoliš sve manji, ali nije zanemariv [8].

2.2. Zagađenje otpadom

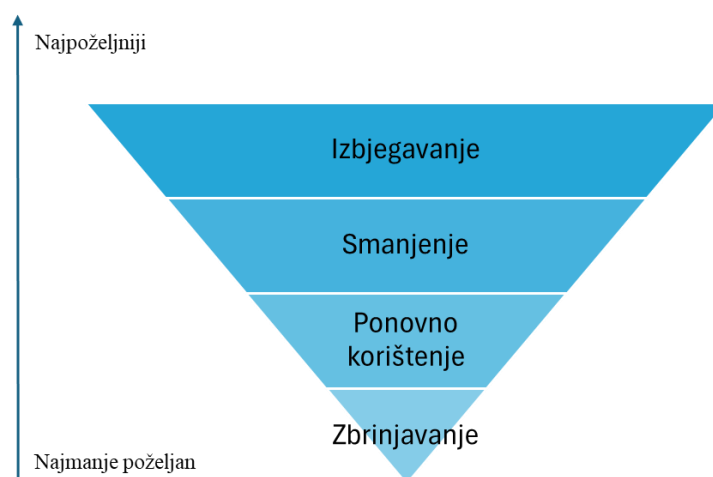
Porastom broja putnika u zračnog prometa posljedično se generira sve više otpada te on predstavlja jedan od najvećih izazova za zrakoplovnu industriju. Prema izvještaju Međunarodnog udruženja za zračni promet (engl. *The International Air Transport Association – IATA*) iz 2023. godine, prosječni putnik po letu proizvede 1,43 kg otpada ili promatrano na godišnjoj razini ukupno za sve prevezene putnike, generira se gotovo šest milijuna tona kabinskog otpada [9]. U praksi se kroz razne operacije i aktivnosti zračne luke susreću s različitim vrstama otpada koji se mogu podijeliti u sljedeće kategorije [10]:

- Čvrsti komunalni otpad (engl. *Municipal Solid Waste – MSW*): svakodnevni predmeti poput raznih boca i spremnika (plastika, staklo, aluminij), vrećica ili pak raznih proizvoda od papira i kartona. S ovom vrstom otpada zračne luke imaju najveće mogućnosti u gospodarenju, te se pojavljuje u sljedećih nekoliko primarnih izvora:
 - otpad sa putničkih terminala (s javnih površina i administrativnih ureda zračnih luka),
 - otpad korisnika putničkih terminala (od maloprodaje i koncesija na putničkim terminalima),
 - otpad od zračnih prijevoznika (iz zrakoplova i njihovih ureda),
 - otpad od tereta (otpada koji se stvara prilikom manipulacije teretom).
- Građevinski otpad i otpad od rušenja (engl. *Construction and Demolition Debris – CDD*): otpad koji se pojavljuje prilikom građevinskih radova na zračnoj luci ili čišćenja i iskopavanja zemljišta, poput betona, cigle, drva, zemlje, pijeska, šljunka i sl.
- Otpad od letova/otpada iz zrakoplova: posebna vrsta komunalnog otpada koji se uklanja iz putničkog zrakoplova. Gotovo 20% ukupnog komunalnog otpada u zračnoj luci dolazi od iskrcanog otpada nakon letova, poput otpada od *catering-a*, kolica za hranu, i sl.
- Otpad sa međunarodnih letova: otpad koji se stvara na međunarodnim letovima, a također može uključivati i otpad sa putničkih terminala za međunarodni promet. Iako je vrlo sličan komunalnom otpadu, zbog različitih lokalnih regulativa, ovaj otpad se zbrinjava odvojeno od ostalog, te se najčešće spaljuje.
- Biorazgradivi otpad i otpad koji se može kompostirati: otpad koji nastaje održavanjem okoliša zračne luke (grane, lišće, trava, i sl.), te otpad u koji spada nekonzumirana hrana i ostaci hrane.
- Opasan i industrijski otpad: otpad koji nastaje održavanjem aerodroma, zrakoplova i zemaljske opreme, te otpad koji se stvara kod procesa opskrbe zrakoplova gorivom i procesa odleđivanja/zaštite zrakoplova protiv zaleđivanja. U ovaj otpad spadaju ulja, boje, *de-icing* tekućine i ostali kemijski otpad, te on podliježe posebnim zakonskim regulativama i zahtjevima za zbrinjavanjem.
- Otpad iz toaleta/otpadne vode: zahtjeva poseban oprez prilikom manipuliranja kako bi se zbog mogućeg curenja izbjegle opasnosti za okoliš i ljudsko zdravlje. Ovaj otpad sadrži kemikalije i potencijalne crijevne patogene.

Zračne luke imaju izbor u upravljanju prikupljanjem, obradom i skladištenjem MSW-a i CDD-a. Kada se upravljanje otpadom provodi na korisne načine, može se poboljšati rad zračne luke i smanjiti utjecaj na okoliš. Prema Priručniku o pravilima i preporučenim praksama (engl. *Policy and Recommended Practices Handbook*) Međunarodnog vijeća zračnih luka (engl. *Airport Council International – ACI*) zračne bi luke trebale promovirati kulturu izbjegavanja stvaranja otpada gdje je moguće, te bi trebale izvući vrijednosti od preostalog otpada s krajnjim ciljem bez otpada na odlagalištima [10].

U nastavku je navedena hijerarhija gospodarenja otpadom prema Programu Ujedinjenih naroda za okoliš (engl. *United Nations Environment Programme – UNEP*) (prikazano na slici 2) [10]:

- Izbjeći (engl. *to avoid*): mjere koje bi se trebale implementirati prije nego se stvori otpad, nalazi se na vrhu hijerarhije upravljanja otpadom.
- Smanjiti (engl. *to reduce*): može doprinijeti održivosti zračne luke i smanjenju troškova. Ekonomičnija upotreba materijala.
- Ponovno koristiti (engl. *to reuse*): ponovna upotreba ili prenamjena materijala u dogovoru s zakupcima zračne luke (npr. upotreba specifičnih materijala, sredstava za čišćenje ili boja).
- Reciklirati (engl. *to recycle*): uspostava programa recikliranja uobičajen je način smanjenja otpada. Otprilike 75% otpada u zračnim lukama može se reciklirati ili kompostirati (npr. papir je najveća kategorija komunalnog otpada koju stvara zrakoplovna industrija). Postoje dvije vrste recikliranja: recikliranje čvrstog komunalnog otpada koji može doprinijeti i troškovnom uštedom, ali zahtijeva uvođenje određenih procesa, te recikliranje građevinskog otpada koji može doprinijeti uštedom materijala i troškova, ali zahtijeva pažljivo planiranje.
- Zbrinuti (engl. *to dispose*): dio otpada se ipak mora zbrinuti, te su odlagališta ili spalionice česti izbor zračnih luka.



Slika 2. Primjer hijerarhije upravljanja otpadom prema Programu Ujedinjenih naroda za okoliš

Izvor: [10]

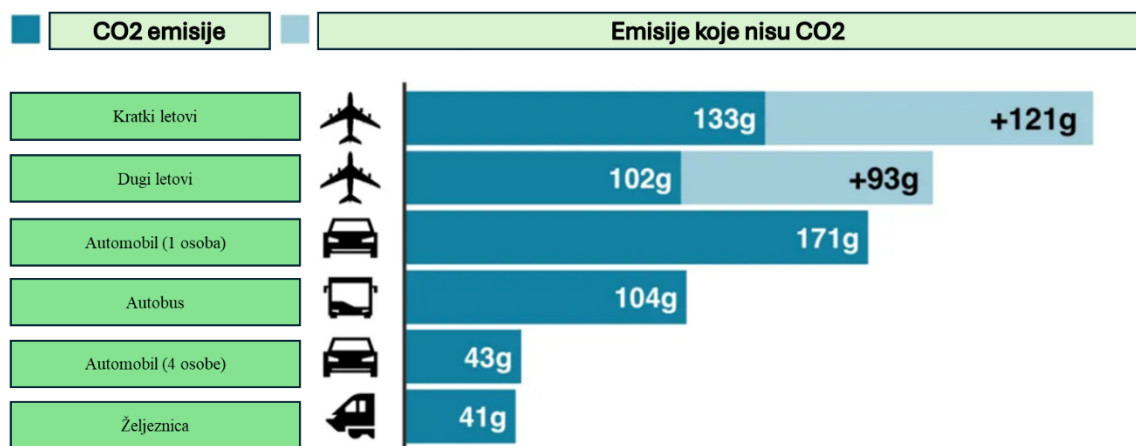
2.3. Zagađenje zraka

Postoje razni čimbenici koji utječu na onečišćenje zraka zračnim prometom, poput tipa zrakoplova ili motora, opterećenja motora pri polijetanju, slijetanju, penjanju, krstarenju i sl. S obzirom da se zračni promet događa na velikim visinama, okoliš se onečišćuje na globalnoj razini, a teže ga je primijetiti na lokalnoj razini [1].

Štetne tvari u zraku, koje se s vremenom razgrade, napadaju važne standardne komponente zraka (ozon) ili pak s oborinama dolaze na površinu zemlje su [1]:

- sumporov (IV) oksid (SO₂) – zadržava se između jednog i šest dana u zraku,
- čestice – zadržavaju se od tri do sedam dana,
- dušični oksidi (NO_x) – zadržavaju se od jedan do tri dana,
- ugljikovodici (HC) – zadržavaju se od jedan do dva dana,
- ugljik (II) oksid (CO) – zadržava se oko četiri mjeseca.

Rast emisija CO₂ iz zračnog prometa ubrzao se prije COVID-19 pandemije, a gotovo pola globalnih emisija CO₂ između 1940. i 2019. godine dogodila se nakon 2000. godine. U 2018. godini procijenjeni efektivni utjecaj zračenja (engl. *Effective Radiative Forcing* – ERF) od emisija koje nisu CO₂ čini više od polovice (66%) neto učinka neto zagrijavanja u zrakoplovstvu, iako je razina nesigurnosti od učinaka koji nisu CO₂ osam puta veća od one CO₂ (prikazano na slici 3). Standardi ekološke certifikacije već postoje za emisije motora koje nisu CO₂ (NO_x i engl. *non-volatile particulate matter* – nvPM), a razmatraju se i daljnje mogućnosti politike ublažavanja [7].



Slika 3. Prikaz učinka CO₂ po putniku naspram učinka od emisija koje nisu CO₂

Izvor: [11]

Emisije CO₂ svih letova iz europskih zračnih luka (EU27+EFTA) dosegle su 147 milijuna tona u 2019. godini (34% više nego u 2005. godini), dok su dugi letovi (iznad 4000 km) činili 6% polijetanja tijekom 2019. godine, to jest polovicu svih emisija NO_x i CO₂ [3].

U već prethodno spomenutom EASA-inom trećem Izvješću o okolišu u europskom zračnom prometu (engl. *European Aviation Environmental Report – EAER*) put do smanjenja utjecaja zračnog prometa na okoliš usmjeren je na nekoliko područja u kojima se može poboljšati razina zaštite okoliša [12]:

- Tehnologija i dizajn [13]:
 - Novi dizajni zrakoplova certificirani u posljednjih deset godina (npr. Airbus 320neo, Airbus 350, Boeing 737MAX, i sl.) imaju kumulativnu marginu od pet do petnaest EPNdB (engl. *Effective perceived noise in decibels – EPNdB*) ispod najnovijeg standarda *Chapter 14*.
 - Nove vrste motora dizajnirane su prije novih standarda o nehlapljivim česticama, te proizvođači procjenjuju kako umanjiti nvPM emisije u tim istim novim dizajnim.
- Održiva zrakoplovna goriva (engl. *Sustainable Aviation Fuel – SAF*) su „obnovljiva i nekonvencionalna alternativa fosilnim gorivima za mlazne motore. Prijelaz na održiva zrakoplovna goriva jedna je od ključnih mjera za smanjenje emisija u sektoru zračne plovidbe [12].“
 - Trenutna opskrba SAF-om unutar EU-a je i dalje niska (manje od 0,05% ukupne potrošnje).
 - Europska komisija predložila je miješanje SAF goriva unutar EU (minimalni udjeli SAF-a koji se povećavaju sa 2% u 2025. godini na 63% u 2050. godini). Da se to postigne, do 2030. godine bilo bi potrebno 2,3 milijuna tona SAF-a. Do 2040. godine bilo bi potrebno oko 14,8 milijuna SAF-a, a do 2050. godine 28,6 milijuna tona. SAF će igrati ključnu ulogu u dekarbonizaciji zračnog sektora, s obzirom da se može koristiti kroz postojeću infrastrukturu opskrbe gorivom [14].
 - Hidroprocesni esteri i masne kiseline (engl. *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids – HEFA*), engl. *Alcohols to Jet*, glasifikacija biomase i Fischer-Tropsch, te engl. *Power-to-Liquid* (PtL) imati će glavnu ulogu u dekarbonizaciji kratkoročno i srednjoročno, a također će dugoročno ostati glavni doprinositelj za dugolinijske letove [14].
 - SAF je certificiran od strane engl. *Sustainability Certificatoin Scheme* (unutar direktive obnovljive energije (engl. *Renewable Energy*)), prema kriterijima definiranim na razini Europske Unije, dok je na globalnoj razini pokriven u okviru CORSIA-e (engl. *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation – CORSIA*). Trenutno certificirani SAF-ovi mogu se miješati do 50% s mlaznim fosilnim gorivom, ali se razmatra buduća upotreba 100% SAF-a do 2030. godine. Trenutno su skuplji od fosilnih goriva, ali se u budućnosti očekuju uštede [14].
- Upravljanje zračnim prometom (engl. *Air Traffic Management – ATM*) i zračnim prijevozniciima: do negativnog utjecaja na okoliš dolazi zbog neučinkovitog sustava upravljanja zračnim prometom. Operativna poboljšanja ATM-a, poput napretka u dizajnu zračnog prostora ili uvođenje interoperabilnih tehnologija, mogu dati znatan doprinos u smanjenju emisija CO₂. Zbog toga je njihovu provedbu potrebno ubrzati.

Glavni europski ATM plan ima jasnu viziju i cilj smanjenja prosječne emisije CO₂ po letu za 5 – 10% (0,8 – 1,6 tona) do 2035. godine u odnosu na 2017. godinu [15].

- Zračne luke: 2020. godine EASA je pokrenula Portal za okoliš kako bi omogućila lakšu razmjenu informacija o buci zrakoplova, zajedno s bazom podataka ANP-a (engl. *Aircraft Noise and Performance data – ANP*). Tijekom 2020. godine, približno 50% operacija u Europi obavljali su zrakoplovi koji su bili u skladu s najnovijim standardnom buke iz *Chapter 14*. Više od devedeset europskih zračnih luka već je postavilo ciljeve za postizanje nula emisija CO₂ do 2030. godine, a već je 10 zračnih luka (kojima upravlja Swedavia) to i postiglo [16].
- Tržišne mjere: bave se utjecajem zrakoplovstva na klimu (izvan onoga što se postiže tehnologijom, operativnim mjerama i održivim zrakoplovnim gorivima), te se njima dopunjuju druge mjere za ublažavanje učinka zračne industrije na klimatske promjene [17].
 - Između 2013. i 2020. godine, ETS (engl. *The EU Emission Trading System – ETS*) doveo je do ukupnog smanjenja emisija CO₂ u zrakoplovstvu od 159 milijuna tona kroz financiranje smanjenja emisija u drugim sektorima. Međunarodna suradnja ključna je u izgradnji kapaciteta za rješavanje globalnih održivih okolišnih izazova s kojima se zrakoplovna industrija suočava [17].

Svake tri godine, Odbor za zaštitu okoliša u zračnom prometu (engl. *Committee on Aviation Environmental Protection – CAEP*) ICAO organizacije, provodi procjenu budućih ekoloških trendova u zračnom prometu, koji uključuje [18]:

- emisije stakleničkih plinova zrakoplovnih motora koji utječu na globalnu klimu,
- buku zrakoplova,
- emisije motora koji utječu na kvalitetu lokalnog zraka.

Prema izvještaju, očekuje se da će emisije prilikom uzlijetanja i slijetanja, te tijekom punog leta u međunarodnom zrakoplovstvu, porasti za dva do četiri puta od 2018. do 2050. godine, ovisno o onečišćivaču (CO₂, NO_x, nvPM ili engl. *Particulate Matter – PM*), dok bi se područje buke (engl. *Day-Night Level – DNL 55 dB*) na tri stotine i devetnaest zračnih luka u analizi (koje predstavljaju 80% globalnog prometa u Sjedinjenim Američkim državama, Europi i Brazilu) moglo stabilizirati nakon 2025. godine prema scenariju poboljšanja napredne tehnologije [18].

U 2018. godini međunarodno je zrakoplovstvo potrošilo približno 188 milijuna tona goriva, što je rezultiralo emisijom CO₂ od 593 milijuna tona. Pretpostavke su da će do 2050. godine potrošnja goriva porasti za 1,9 do 2,6 puta u odnosu na vrijednosti iz 2018. godine, dok se očekuje da će prihod od tonskih kilometara (engl. *Revenue Tonne Kilometers – RTK*) porasti tri puta. Uz pretpostavku najoptimističnijih poboljšanja tehnologije goriva, očekuje se da će se međunarodna učinkovitost goriva (količina goriva po RTK), poboljšati po prosječnoj stopi od 1,53% godišnje (2015.-2050. godine). To ukazuje da će ICAO-ov cilj poboljšanja učinkovitosti goriva od 2% godišnje biti teško ostvariv do 2050. godine [18].

3. PREGLED ALTERNATIVNIH GORIVA I POPRATNE INFRASTRUKTURE

Posljednjih godina korištenje fosilnih goriva postalo je predmetom značajnih kritika. Dnevno se u globalnoj zrakoplovnoj industriji troši više od 1,5 milijuna barela mlaznog goriva, od čega se više od 99% dobiva iz fosilnih goriva [19].

Kako bi se postigli ciljevi neto nulte emisije do 2050. godine u cijeloj zrakoplovnoj industriji, postoji mnoštvo strateških inicijativa, propisa i dokumenata na svjetskoj, europskoj i lokalnoj razini, poput:

- ICAO Annex 16, Zaštita okoliša, Svezak II, CAEP – bavi se bukom i emisijama zrakoplova, te njihovim utjecajem na lokalni zrak i okoliš. Sadrži preporučene standarde i prakse vezane uz emisije zrakoplovnih motora [20].
- ICAO Annex 16, Zaštita okoliša, Svezak IV, CORSIA – prva globalna mjera koja nudi načine za smanjenje emisija u međunarodnom zrakoplovstvu, poštujući posebne okolnosti ICAO država članica [21].
- Europsko vijeće: *ReFuelEu* propis i *Fit for 55* inicijativa – skup prijedloga za reviziju zakonodavstva EU-a i uvođenje novih inicijativa s ciljem osiguravanja da su politike EU-a u skladu s klimatskim ciljevima koje su dogovorili Europsko vijeće i parlament. Cilj ovih mjera i strategija je smanjenje neto emisija stakleničkih plinova za najmanje 55% do 2030. godine unutar EU. Predložena nova pravila obvezuju dobavljače goriva da isporučuju sve veći udio održivog goriva za zrakoplove unutar zračnih luka Europske Unije [22].
- Europska komisija: *European Green Deal* strategija – cilj ove strategije je stvaranje modernog, resursno učinkovitog i konkurentnog gospodarstva s nula emisija stakleničkih plinova do 2050. godine [23].
- *Waypoint 2050* – izvješće koji istražuje kako se sektor može približiti neto nuli emisija CO₂ do 2050. godine uz podršku energetske industrije i vlada, fokusirajući se na nekoliko scenarija, od prognoze rasta prometa, do razvoja tehnologije (električni i hibridni zrakoplovi, zrakoplovi na vodik), poboljšanja infrastrukture i upotrebe održivih goriva [24].
- Hrvatski Sabor: Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine – strategija uporabe vodika kao zamjenu za fosilna goriva [25].

Alternativna goriva se mogu definirati kao „goriva ili izvori energije koji služe, barem djelomično, kao nadomjestak za izvore fosilnih goriva u opskrbi prometa energijom i koji imaju potencijal doprinijeti dekarbonizaciji prometnog sustava, te poboljšati okolišnu učinkovitost prometnog sektora [26].“

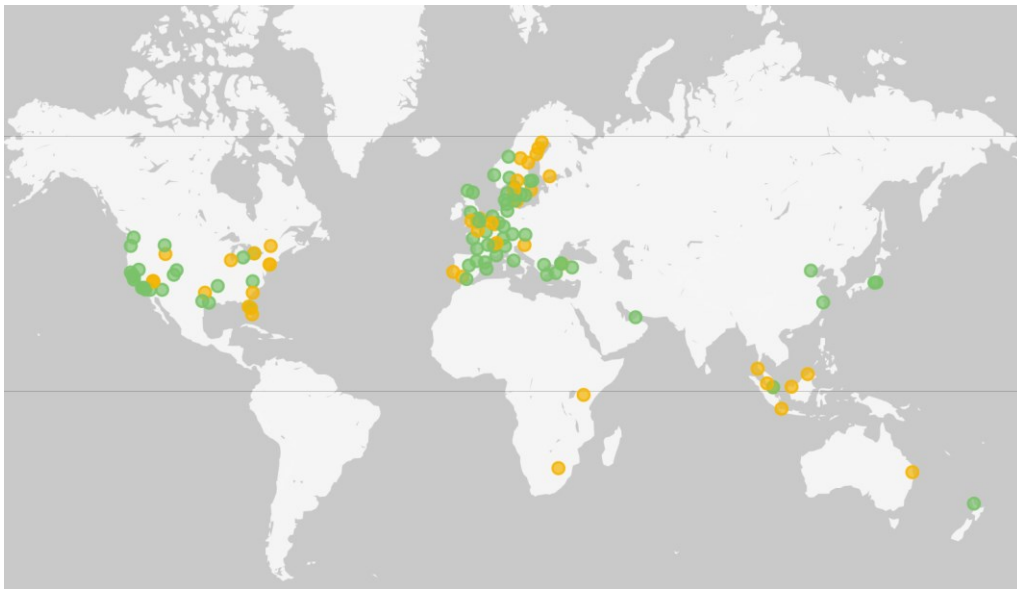
Neki od alternativnih izvora energije su [19]:

- održiva zrakoplovna goriva (SAF),
- vodik,
- električna energija.

3.1. Održiva zrakoplovna goriva

Održiva zrakoplovna goriva su goriva koja se lako se uvode, a proizvode se od biljaka, ulja ili pak otpada. Iako su skupi za proizvodnju i nabavu, a trenutna proizvodnja osigurava manje od 1% svjetskih potreba, SAF je alternativni izvor goriva koji obećava. Smatra se da je tehnologija koja se koristi za proizvodnju SAF-a provjerena, a to pokazuju već uspješni letovi sa sto postotnim udjelom SAF-a [19].

Već postoje razne zračne luke koje nude SAF, kontinuirano ili u serijama, većina ih se nalazi u Europi i Sjevernoj Americi, te nekolicina u Aziji i Africi (prikazano na slici 4). Zračne luke koje imaju kontinuiranu isporuku imaju stalno dostupan SAF za svoje operacije, dok isporuke u serijama znače da su zračne luke imale jednokratne isporuke SAF-a, bilo za jedan ili niz letova [27].



Slika 4. Prikaz zračnih luka koje pružaju SAF (zeleno: kontinuirane isporuke; narančasto: isporuke u serijama)

Izvor: [27]

Razne sirovine mogu se koristiti za proizvodnju SAF-a. Prema CORSIA-i, sirovine se svrstavaju u nekoliko kategorija [28]:

- Primarni proizvodi – glavni proizvodi koji imaju značajnu ekonomsku vrijednost i elastičnu opskrbu (postoje dokazi da postoji uzročna veza između cijena sirovina i količine sirovina koje se proizvode). Primjer: palmino ulje, kamelinovo ulje, ulje jatrofe, uljana repica, šećerna trska, sojino ulje, i sl.
- Nusproizvodi – sekundarni proizvodi s ekonomskom vrijednošću i neelastičnom opskrbom. Primjer: destilat palmine masne kiseline, goveđi loj, svinjska mast, nestandardni kokosi, i sl.
- Otpad – materijal s neelastičnom opskrbom i bez ekonomske vrijednosti. Primjer: čvrsti komunalni otpad, korišteno ulje za kuhanje, otpadni plinovi.

- Ostaci – sekundarni materijali s neelastičnom opskrbom i malom ekonomskom vrijednošću. Primjer: poljoprivredni ostaci (klipovi, ljuške, peteljke, slama, i sl.), šumski ostaci (kora, grane, krošnje drveća, lišće, i sl.), ostaci prerade (sirovi glicerini, sirovo talovo ulje, otpadne vode iz tvornice palminog ulja, mulj, i sl.).

Procese konverzije SAF-a odobravaju organizacije poput američkog udruženja za testiranje i materijale (engl. *American Society for Testings and Materials – ASTM International*). Od srpnja 2023. godine odobreno je jedanaest procesa pretvorbe za proizvodnju SAF-a (prikazano u tablici 1), dok je još jedanaest trenutno u ASTM evaluaciji, što je detaljnije prikazano u tablici 2 [29].

Tablica 1. Odobreni procesi pretvorbe SAF-a

R. br.	ASTM reference	Proces pretvorbe	Kratica	Moguće sirovine	Maksimalni omjer miješanja
1	ASTM D7566 Annex A1	Fischer-Tropsch hidroprocesni sintetizirani parafinski kerozin	FT	Ugljen, prirodni plin, biomasa	50%
2	ASTM D7566 Annex A2	Sintetizirani parafinski kerozin iz hidroprocesiranih estera i masnih kiselina	HEFA	Biljna ulja, životinjske masti, rabljena ulja za kuhanje	50%
3	ASTM D7566 Annex A3	Sintetizirani izoparafini iz hidroprocesiranih fermentiranih šećera	SIP	Biomasa koja se koristi za proizvodnju šećera	10%
4	ASTM D7566 Annex A4	Sintetizirani kerozin s aromatima dobivenim alkilacijom lakih aromata iz nenaftnih izvora	FT-SKA	Ugljen, prirodni plin, biomasa	50%
5	ASTM D7566 Annex A5	Alkohol za mlazni sintetski parafinski kerozin	ATJ-SPK	Etanol, izobutanol i izobuten iz biomase	50%
6	ASTM D7566 Annex A6	Mlazno gorivo za katalitičku hidrotermolizu	CHJ	Biljna ulja, životinjske masti, rabljena ulja za kuhanje	50%
7	ASTM D7566 Annex A7	Sintetizirani parafinski kerozin iz ugljikovodika - hidroprocesiranih estera i masnih kiselina	HC-HEFA-SPK	Alge	10%

8	ASTM D7566 Annex A8	Sintetski parafinski kerozin s aromatima	ATJ-SKA	C2-C5 alkoholi iz biomase	
9	ASTM D1655 Annex A1	Kohidroprocesiranje estera i masnih kiselina u konvencionalnoj rafineriji nafte		Biljna ulja, životinjske masti, rabljena jestiva ulja iz biomase prerađena naftom	5%
10	ASTM D1655 Annex A1	Kohidroprocesiranje Fischer-Tropschovih ugljikovodika u konvencionalnoj rafineriji nafte		Fischer-Tropsch ugljikovodici koprocesirani s naftom	5%
11	ASTM D1655 Annex A1	Koprocesiranje HEFA-e		Hidroprerađeni esteri/masne kiseline iz biomase	10%

Izvor: [29]

Tablica 2. Procesi pretvorbe SAF-a u evaluaciji

R.br.	Proces pretvorbe u evaluaciji	Kratice	Glavni razvojni tim
1	Sintetizirani aromatski kerozin	SAK	Virent
2	Integrirana hidropiroliza i hidrokonverzija	IH2	Shell
3	Jednostruki reaktor HEFA (<i>Drop-in</i> održivo tekuće zrakoplovno i automobilsko gorivo)	DILSAAF	Indian CSIR-IIP
4	Piroliza plastike koja se ne može reciklirati	ReOIL	OMV
5	Koprocesiranje piroliznog ulja iz rabljenih guma	TPO	Philips 66
6	Metanol u mlazno gorivo	MTJ	ExxonMobil
7	Povećanje suprocesiranja masne kiseline/estera s 5% na 30%		
8	HEFA s višim cikloparafinima		Revo
9	Piroliza biomase		Alder
10	Piroliza biomase/otpada		Green Lizard
11	Cikloalkani iz etanola		Vertimass

Izvor: [29]

SAF goriva koriste istu infrastrukturu za distribuciju goriva kao i mlazna goriva. Industrija komercijalnog zrakoplovstva ima visoke standarde kvalitete za gorivo, te je usvojila stroge sigurnosne standarde i procedure u radu i održavanju svoje opreme. Gorivo unutar spremnika zrakoplova često je iz različitog izvora, s obzirom da zrakoplovi često pune gorivo u različitim državama. Stoga je potrebno uskladiti tehničke specifikacije SAF-a [30].

Zbog stroge kontrole kvalitete zrakoplovnih goriva, uvođenje goriva iz različitih izvora zahtijeva implementaciju koncepta „*drop-in*“ goriva. Mješavina *drop-in* mlaznog goriva, kada se pomiješa s konvencionalnim mlaznim gorivom, je u potpunosti kompatibilna s njim, to jest zamjena je za isto. *Drop-in* gorivo ne zahtijeva prilagodbu sustava goriva zrakoplova i motora ili pak distribucijske mreže goriva – može se koristiti „kakvo je“ u zrakoplovima s turbinskim pogonom, te je ključan za zrakoplovnu industriju jer se njime rukuje zajedno sa bilo kojim drugim zrakoplovnim gorivom. Bilo koje drugo ne *drop-in* gorivo predstavljalo bi rizike i sigurnosne probleme vezane uz rukovanje i zahtijevalo bi dodatnu paralelnu i skupu infrastrukturu u svim zračnim lukama [30].

ICAO, države članice i zrakoplovna industrija su prepoznali potencijal SAF-a za smanjenje stakleničkih plinova (engl. *Greenhouse Gas* – GHG), te su uključili SAF u paket mjera pomoći državama članicama u planiranju i izradi akcijskih planova za smanjenje CO₂ emisija. Prema ICAO procjeni trendova iz 2016. godine, 100-postotna zamjena zrakoplovnog goriva sa SAF-om mogla bi smanjiti 63% emisija CO₂ iz međunarodnih letova u 2050. godini. U postizanju ugljično neutralnog rasta, to bi bio najznačajniji doprinos zrakoplovstva [30].

Civilno zrakoplovstvo, kao globalno poslovanje, djeluje prema međunarodnim protokolima i pravilima, uključujući ICAO standarde i preporučenu praksu (engl. *Standards and Recommended Practices* – SARPs). Zračni prijevoznici se također obvezuju nacionalnim propisima država u kojima posluju, što čini državne vlasti jedne od važnijih dionika za rast, razvoj i promicanje inovacija u industrija biogoriva. Neki od ostalih dionika koji su direktno uključeni u razvoj i istraživanje (engl. *Research & Development* – R&D) i implementaciju SAF-a su zračni prijevoznici i zračne luke, proizvođači zrakoplova i dodatne opreme, proizvođači i distributeri goriva, ekološke agencija, financijske i regulatorne agencije i sl., [30].

Ako država odluči ulagati u R&D SAF-a, moraju biti ispunjeni osnovni uvjeti. Uz pretpostavku da će financijska sredstva biti dostupna, a da će se poštivati međunarodni propisi i smjernice (poput *drop-in* principa ili certificiranih procesa), potrebno je i važno procijeniti pravni okvir, potrebnu infrastrukturu, te poljoprivredni potencijal za proizvodnju sirovine [30].

Prvi uvjet koji se treba razmotriti je pravni okvir i povezana struktura. Nužna je jasna definicija odgovornosti i specifikacija kvalitete goriva, praćenje i provedba kroz usvajanje transparentnih i dosljednih procedura. Važan signal vladine predanosti u poticanju SAF-a predstavlja zakonodavstvo s jasnim pravima i ograničenjima, koji može smanjiti rizik za tržišne igrače. U suprotnom, nedostatak zakonodavstva kojim bi se regulirati sektori zrakoplovstva goriva može se smatrati kao barijera rasta SAF-a [30].

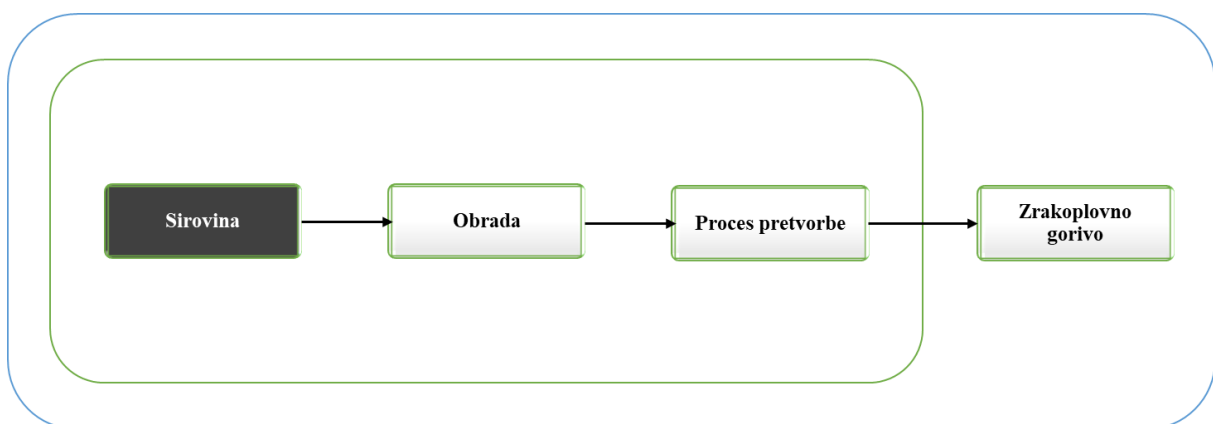
Drugi uvjet je infrastruktura, poput cesti i skladišnih sustava. Izvedivost proizvodnje SAF-a izravno ovisi o održivim sirovinama po konkurentnim cijenama, što je izravna funkcija postojeće opskrbe infrastrukture. Primjerice, za biodizel i etanol cijena sirovina na ulazu u tvornicu za pretvorbu jednaka je otprilike tri četvrtine konačne cijene goriva, uz dodatan doprinos troškova transporta [30].

Cijena SAF-a ovisi i o troškovima zemljišta i transporta. U područjima s dobrom infrastrukturom ili u blizini proizvodnih pogona, zemljišta su skuplja u odnosu na područja koja su udaljena od proizvodnih pogona ili bez infrastrukture. Prijevoz sirovina ima veći utjecaj na finalnu cijenu goriva, te je važno proširiti i ojačati prometnu infrastrukturu kako bi se promicala konkurentna proizvodnja SAF-a. Proširena prometna infrastruktura donosi i bolje uvjete za proizvodnju drugih poljoprivrednih proizvoda, te za prikupljanje i transport otpada, uzimajući u obzir udaljenost između proizvodnog pogona od mjesta gdje se otpad nalazi [30].

U usporedbi s dostupnošću sirovine, prometna infrastruktura i infrastruktura skladištenja SAF-a predstavlja manji problem: prevozi se kamionima, miješa na terminalima distributera, te zahtijeva relativno jednostavnu opremu i spremnike. Količina SAF-a koju treba transportirati ne opravdava prihvaćanje drugih mogućnosti poput cjevovoda [30].

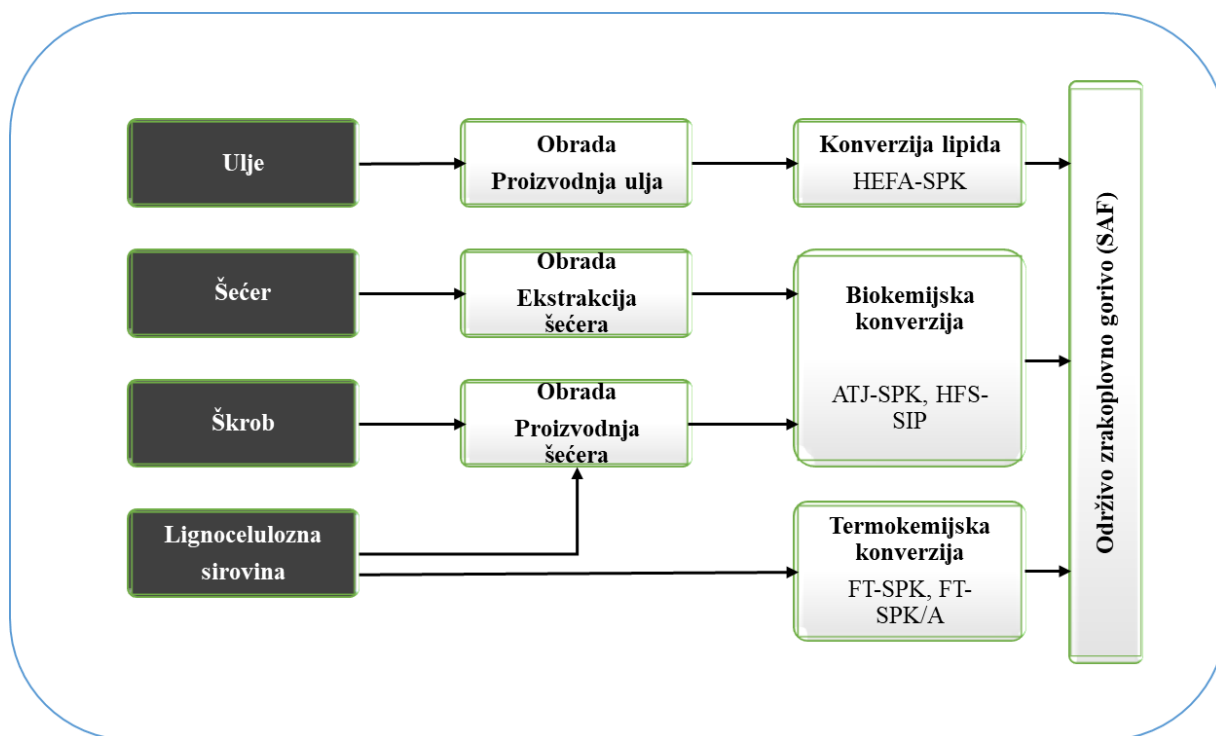
Kao jedan od mogućih izvora sirovine za proizvodnju SAF-a, poljoprivreda i njen potencijal predstavljaju treći uvjet koji se treba razmotriti. Analizirajući potencijal poljoprivrede za održivu proizvodnju sirovina SAF-a, potrebno je uzeti u obzir i druge namjene zemljišta (npr. proizvodnja hrane) i ekološka ograničenja (npr. kulturna i prirodna baština, bioraznolikost, očuvanje vodenih resursa) [30].

Proizvodni put goriva (engl. *Production Pathway*) sadrži nekoliko faza – proizvodnja sirovine, njezina obrada kako bi se postigli zahtjevi procesa pretvorbe, te završni procesi pretvorbe i nastajanja zrakoplovnog goriva. Na slici 5 i 6 navedeni su primjeri proizvodnih puteva goriva. Izvedivost proizvodnje goriva usko je povezana s konfiguracijom proizvodnog puta, koji uključuje i transport proizvoda kroz faze [30].



Slika 5. SAF koncept proizvodnih puteva

Izvor: [30]



Slika 6. SAF proizvodni putevi – procesi pretvorbe
Izvor: [30]

Emisije CO₂ mogu nastati tijekom uporabe, obrade ili transporta SAF-a. Specifične kombinacije sirovina koje se koriste za proizvodnju SAF-a i procesa mogu rezultirati vijekom trajanja emisija CO₂ koji su ili viši ili niži od osnovne vrijednosti (89g CO₂e/MJ). Ali, samo ona goriva s nižim vijekom trajanja emisija od osnovne vrijednosti bit će ekološki korisna [30].

3.2. Vodik kao gorivo

Dekarbonizacija u civilnom zrakoplovstvu i smanjenje emisija ovisi o raznim tehnologijama i budućim rješenjima, gdje bi vodik (H₂) mogao imati značajnu ulogu. Vodik se smatra poželjnim rješenjem koje bi trebalo omogućiti prelazak s fosilnih goriva na čistu energiju iz obnovljivih izvora. Ono što vodik čini zanimljivim je dostupnost u velikim količinama, te proizvodnja i upotrebljavanje bez stvaranja CO₂ [31].

Vodik je najzastupljeniji i najlakši element, koji se nalazi u plinovitom obliku na sobnoj temperaturi. Takav ima vrlo nisku gustoću, a za primjenu u zrakoplovstvu vodik u tekućem stanju ima veći potencijal. Do tekućeg stanja dolazi zbog hlađenja na - 253°C. Da se izbjegne isparavanje, prekomjerni tlak ili kvarovi, bitno je koristiti izolaciju visokih performansi, dok spremnici za skladištenje vodika moraju imati senzore tlaka i sigurnosne ventile [32].

Prema Airbus-u, postoje dvije primarne upotrebe vodika [33]:

- Pogon na vodik – vodik se može pretvoriti u električnu energiju koja nadopunjuje plinsku turbinu putem gorivih ćelija ili može sagorijevati putem modificiranih plinsko-

turbinskih motora. Kombinacija oba stvara učinkovit hibridno-električni pogonski lanac koji u potpunosti prekreće vodik.

- Sintetičko gorivo – vodik se može koristiti za stvaranje e-goriva, koja se dobivaju isključivo iz obnovljivih izvora energije.

S ciljem nulte stope ugljika i emisija općenito u zrakoplovstvu, vodik se razmatra za smanjenje bruto emisija CO₂ i za postupno smanjenje svih emisija. Da bi se uopće razmišljalo o redovitoj upotrebi i dostupnosti vodika u zračnim lukama, trebalo bi riješiti pitanja lanca opskrbe i infrastrukture. Za početak, upotreba vodika bi trebala biti okrenuta na kraće međugradske i regionalne letove. Za veće zrakoplove i duže relacije, kao dugoročni cilj, trebalo bi značajno promijeniti konstrukcije zrakoplova. Te promjene bi osigurale prostor za veliki volumen vodika [31].

3.2.1. Metode proizvodnje vodika

Vodik se u prirodnom obliku veže za kemijske spojeve, te ga je potrebno izolirati iz spoja u kojem se nalazi. Da bi se izolirao, koriste se različite tehnologije poput reformacije (prerade) prirodnog plina (tzv. sivi vodik) ili elektrolizom vode koristeći obnovljive izvore energije – OIE (tzv. zeleni, obnovljivi vodik). S ciljem prilagodbe za siguran transport i krajnju upotrebu, nakon proizvodnje vodik prolazi obradu i pripremu u elektrolizatoru. Neke od tehnologija pripreme vodika su tehnologije ovlaživanja i odvlaživanja, tehnologije separacije ili odvajanja, ukapljivanja, uplinjavanja, kompresije i terminalne obrade vodika (grijanje i hlađenje) [25].

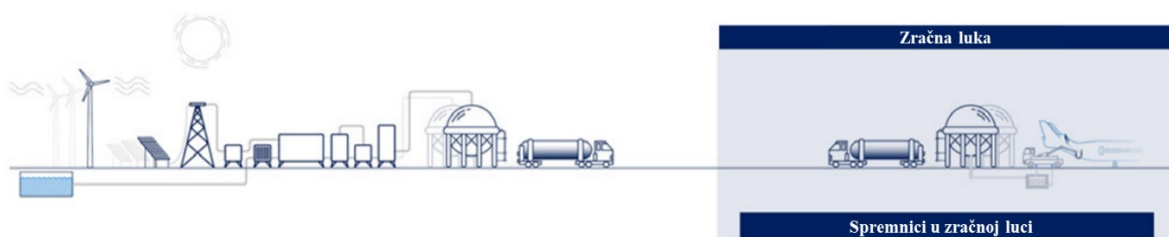
Tri su uobičajene metode proizvodnje vodika, koje rezultiraju spomenutim sivim, plavim i zelenim vodikom. Najčešća metoda je proces parne reforme metana (engl. *Steam Methane Reforming* – SMR), koja koristi metan kao sirovinu, te stvara CO₂ kao nusproizvod odvajanja ugljika od vodika u molekuli metana. Taj vodik je sivi vodik i nije rješenje za dekarbonizaciju zrakoplovstva jer se CO₂ ispušta u atmosferu. Ako se CO₂ uhvati, ne ispušta u atmosferu i skladišti, vodik se naziva plavi vodik. Iako plavi vodik smanjuje CO₂ emisije, potrebno je koristiti prirodni plin. Čisti, to jest zeleni vodik nastaje elektrolizom vode, koja koristi električnu energiju za razdvajanje vode na vodik i kisik. Zrakoplovstvo bi trebalo težiti korištenju zelenog vodika iz obnovljivih izvora električne energije, ali potrebna su značajna ulaganja u tehnologiju, infrastrukturu i proizvodnju [32]. Prema procjenama *FlyZero* projekta, da se zadovolji moguća potražnja u zrakoplovstvu u 2050. godini, moglo bi biti potrebno više od 70 milijuna tona ukapljenog vodika, s procjenom oko 3800 TWh električne energije za proizvodnju zelenog vodika, te 1400 milijuna tona vode godišnje (koja se može dobiti iz pročišćene morske vode) [32].

3.2.2. Opskrba vodikom i infrastruktura zračnih luka

Proizvodnja, transport i skladištenje vodika bit će izazovna, te će ovisiti o veličini zračne luke, lokaciji, geografiji i opsegu potražnje za vodikom. Proizvodnja potrebnih količina vodika zahtijevat će nepredvidljive kapacitete obnovljive energije. Predviđa se da će u početku većina zračnih luka biti opskrbljena tekućim vodikom proizvedenim i ukapljenim van zračnih luka,

transportirani cisternama do zračne luke (scenarij 1). S povećanjem potražnje, opskrba vodikom kroz plinovode s ukapljivanjem u zračnoj luci mogla bi postati poželjno rješenje (scenarij 2), te bi se dugoročno vodik mogao biti proizveden i ukapljen lokalno u zračnoj luci (scenarij 3) [32].

Potrebna infrastruktura zračne luke ovisit će o načinu isporuke vodika. U slučaju najjednostavnijeg scenarija 1 (prikazano na slici 7), distribucija vodika se događa putem cisterni te se vodik istovara u spremnike u zračnoj luci. Spremnici bi trebali biti dovoljno veliki da zadovolje potražnju zračne luke, te bi trebali imati jako dobru izolaciju, kako bi se spriječio isparavanje. Skladištenje tekućeg vodika već je poznato, te postoji industrija i proizvođači koji mogu isporučiti potrebnu infrastrukturu. Paralelno, zračne luke bi trebale moći držati dvodnevnu zalihu goriva u slučaju prekida opskrbe vodikom [32].



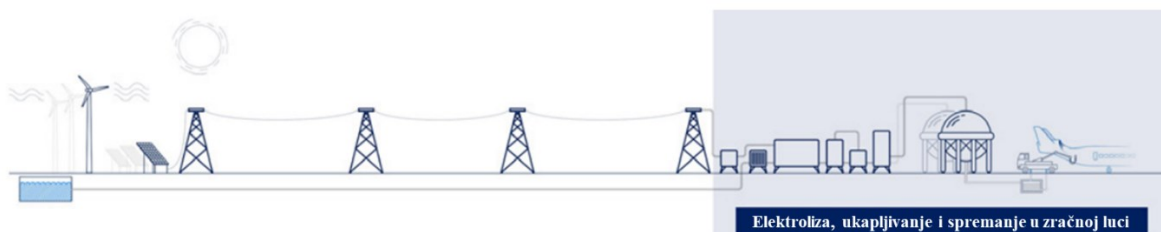
Slika 7. Scenarij 1, vodik proizveden i ukapljen van zračne luke, transportirani cisternama
Izvor: [32]

Scenarij 2 će se javiti kod povećane potražnje za vodikom. U tom scenariju (prikazano na slici 8), vodik je proizveden van zračne luke i dostavljen cjevovodima, te je ukapljen u zračnoj luci. Promjer cjevovoda varirat će o raznim faktorima poput veličine zračne luke, unosa vodika u zrakoplov, duljine cijevi, razlike tlaka, ventila ili zavoja. Pretpostavlja se da će ovaj scenarij biti široko prihvaćen, s obzirom da je distribucija plinovitog vodika cjevovodom na velike udaljenosti izvediva kroz prenamjenu cjevovoda za prirodni plin i izgradnju namjenskih cjevovoda za vodik. Iako je pretpostavka da će ovaj način biti dobro prihvaćen, on zahtijeva velika kapitalna ulaganja u izgradnju novog cjevovoda i postrojenja [32].



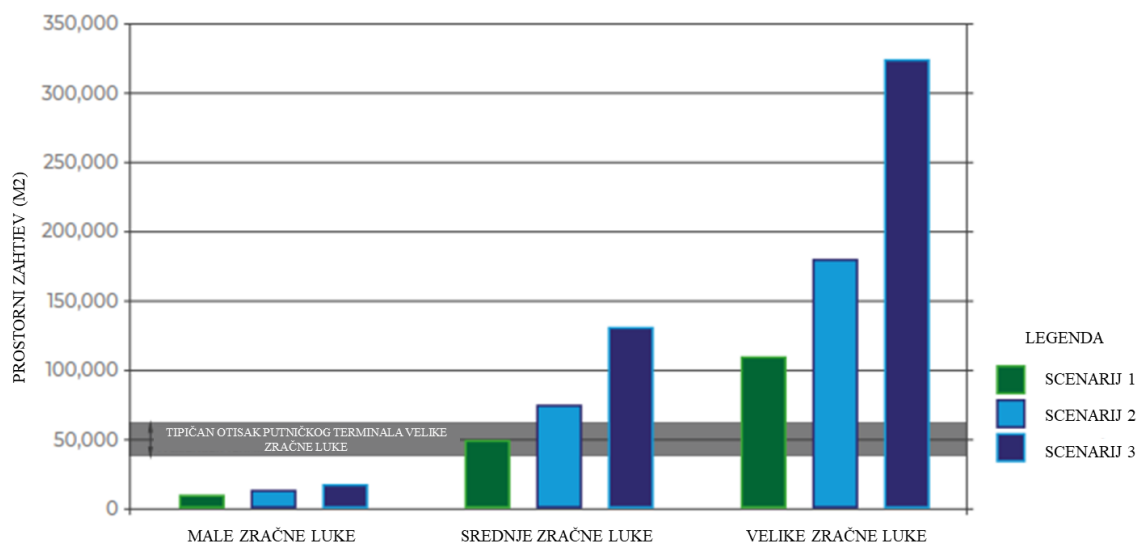
Slika 8. Scenarij 2, vodik proizveden van zračne luke, isporučen plinovodom i ukapljen u zračnoj luci
Izvor: [32]

Treći scenarij (prikazan na slici 9) pretpostavlja da se vodik proizvodi u zračnoj luci elektrolizom. Ukapljivanje i elektroliza zahtijevaju znatnu količinu električne energije, te bi u tom slučaju bili potrebni električni vodovodi velike snage da se isporuči potrebna energija. Električni vodovi mogu prenijeti velike količine energije, ali ne toliko koliko mogu plinovodi velikih promjera. Zbog potrebe za tolikom količinom energije, smatra se da ovaj scenarij neće biti prikladan za većinu zračnih luka [32].



Slika 9. Scenarij 3, vodik proizveden i ukapljen lokalno u zračnoj luci
Izvor: [32]

Prostorni zahtjevi u zračnim lukama za sva tri scenarija u 2050. godini prikazani su na slici 10.



Slika 10. Prikaz prostornog zahtjeva za tri infrastrukturna scenarija
Izvor: [32]

Što se tiče punjenja goriva i servisiranja zrakoplova, morat će se odvijati sigurno i učinkovito uz konvencionalne zrakoplove, u početku najvjerojatnije putem mobilnih *bowser* kamiona za gorivo, a kako bi potražnja rasla, potencijalno bi bio potreban sustav hidranata s tekućim vodikom. Instalacija tih hidranata bila bi složenija od trenutne instalacije koja se koristi za kerozin, jer bi zbog svojstva vodika bile potrebne kriogene cijevi i skladištenje. Bez obzira

što tehnologija potrebna za opskrbu vodikom do zračnih luka i zrakoplova već postoji, razvijanje infrastrukture na razini zračne luke biti će izazovna [32].

Suradnja i integracija kroz cijelu zrakoplovnu industriju su ključni faktori da se osigura paralelno razvijanje zrakoplova na tekući vodik i zračne infrastrukture, propisa i opreme za servisiranje. Sljedeći koraci bi bili: kvantitativna procjena rizika, promjene regulacije, razvoj proizvoda i fizička ispitivanja [32].

3.3. Električna energija

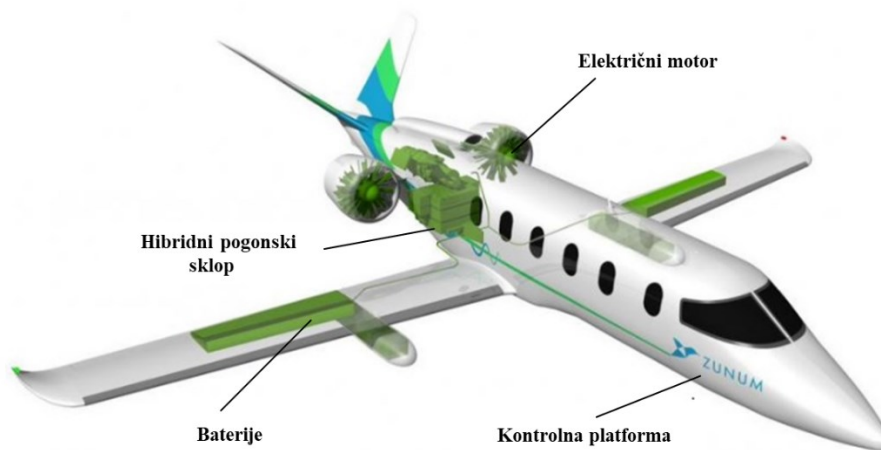
Elektrifikacija postaje sve značajniji globalni segment koji se može primijetiti kroz razne aspekte u svakodnevnom životu, pa tako i u prometnom sektoru. Iako u zračnom prometu postoji duga povijest korištenja električne energije u zrakoplovima, tek zadnjih deset godina je vidljiviji značajniji napredak u elektrifikaciji zrakoplovnog pogonskog sustava.

3.3.1. Električni zrakoplovni pogonski sustavi

Pod električnim zrakoplovnim pogonskim sustavima smatraju se sustavi koji električnu energiju pomoću elektromotora pretvaraju u mehaničku. Ovisno o rasporedu električnog pogonskog sklopa i opsegu korištenja izvora električne energije, razlikuju se tri glavna rješenja: potpuno električni pogonski sustav, turbo-električni pogonski sustav i hibridni pogonski sustav [34].

- Turbo-električni pogonski sustavi su sustavi kod kojih turbina služi za pokretanje generatora koji putem istosmjernih sabirnica prenose električnu energiju do elektromotora kojim se potom pokreće zrakoplovni pogon. Kod ovih sustava se ne koriste baterije kao izvor energije. Turbo-električni zrakoplovni pogonski sustavi dijele se na [34]:
 - Djelomični turboelektrični – sustav kod kojeg se za pogon zrakoplova djelomično koristi električna energija, a djelomično plinska turbina.
 - Potpuno turboelektrični – konfiguracija kod koje turbina u potpunosti pokreće generatora za stvaranje električne energije za napajanje elektromotora kojim se pokreće zrakoplovni pogon.
- Hibridni pogonski sustavi su sustavi koji kao pogon koriste izvore električne energije i plinske turbine, a koji također služe za stvaranje električne energije za vrijeme leta (prikaz hibridnog zrakoplova na slici 11). Vrste hibridnih zrakoplovnih sustava su [34]:
 - Paralelni hibridni sustav – konfiguracija kod koje su na pogonskoj osovini instalirani pogonska turbina i motor koji koristi bateriju ili neki drugi izvor električne energije. Za pogon zrakoplova se u bilo kojem trenutku može koristiti bilo koji od sustava.
 - Serijski hibridni sustav – koncept kod kojeg je plinska turbina odvojena od pogona zrakoplova te isključivo služi kao izvor napajanja za generator. Generator pretvara mehaničku u električnu energiju koja služi za pogon zrakoplova i punjenje baterije.

- Paralelno-serijski hibridni sustav – sustav kod kojeg zrakoplovni pogon može biti pogonjen isključivo elektromotorom ili direktno plinskom turbinom. Kod ovog sustava, elektromotor može dobivati energiju preko baterije ili generatora pogonjenog turbinom.
- Potpuno električni zrakoplovi imaju najjednostavniju konfiguraciju koja se koristi, a kod koje je električna energija jedini pogonski izvor. Izvor napajanja elektromotora su najčešće baterije ili gorivi članci [35].



Slika 11. Hibridni zrakoplov Zunum Aero ZA10
Izvor: [36]

3.3.2. Baterije – izvori napajanja

Budući da je SAF i dalje izazovan za primjenu u većim razmjerima, tehnologija baterija za električne zrakoplove ima sve veći interes. Iako i električni zrakoplovi imaju svoje izazove, osim što bi bili potpuno bez emisija, dugoročno bi mogli ponuditi veću uštedu troškova, dugovječnost i manje održavanja, u usporedbi sa SAF-om [37].

Baterije su uređaji koji putem kemijskih reakcija između dvije elektrode (anode i katode), napravljene od različitih materijala, pretvaraju kemijsku u električnu energiju, koja se zatim koristi za napajanje i rad drugih uređaja i sustava. Baterije mogu biti za jednokratnu upotrebu ili se mogu ponovo puniti, mogu imati jednu ili više ćelija, a ovisno o materijalima od kojih su napravljene ovisit će njihov napon i količina energije koja može biti pohranjena [39]. Neke od baterija koje se koriste u zrakoplovima su [39]:

- Olovne baterije su prva vrsta baterija koja se počela koristiti u zrakoplovima. Iako su vrlo teške i imaju nisku energetska gustoću, zbog učinkovite opskrbe energijom i

skladištenja iste, trenutno su jedna od najčešćih baterija koje se koriste u zrakoplovima. Rade na principu kemijskih reakcija između olovnog oksida (anoda) i čistog olova (katoda) uronjenih u otopinu sumporne kiseline (elektrolit). S olovnim baterijama treba biti izrazito oprezan jer se mogu zapaliti i eksplodirati ako se previše napune.

- Nikal kadmij (Ni-Cd) baterije imaju različite primjene u zrakoplovima, pouzdane su, s malo održavanja i širokim rasponom radnih temperatura. Ako se prepune, mogu doživjeti tzv. toplinski bijeg (engl. *Thermal runaway*). U njihovoj proizvodnji se koriste teški metali, tako da mnoge zemlje nameću stroge regulative o odlaganju ovih baterija.
- Uspješna upotreba litij-ionskih baterija (Li-ion) u autoindustriji potaknula je dodatna ulaganja u istraživanje i razvoj ovih baterija u zrakoplovnoj industriji. Ove su baterije sekundarne, to jest mogu se puniti, a promatrano u odnosu na Ni-Cd baterije, Li-ion baterije očituju se u većoj gustoći energije, te u tri puta višem naponu ćelije.

3.3.3. Infrastruktura

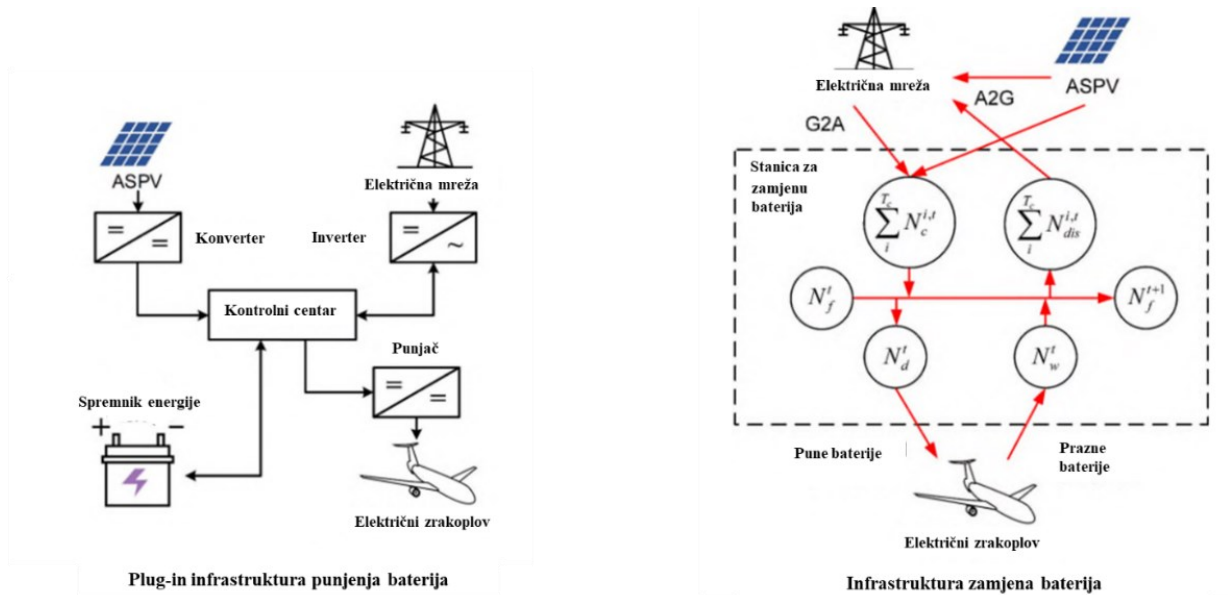
Usporedno s razvojem električnih zrakoplova, postavlja se zahtjev prema zračnim lukama za razvojem potrebne infrastrukture, u vidu visoko naponskih sustava punjenja sposobnih za isporuku velikih količina električne energije u kratkom vremenskom roku. Dodatni izazovi se očituju kroz integraciju punjača u već postojeću infrastrukturu zračnih luka i zadovoljavanje dodatne potražnje za električnom energijom [40]. Razvoj infrastrukture za punjenje baterija je jedan od bitnih preduvjeta kako bi budućnost električnih zrakoplova bila moguća i mora se odvijati usporedno sa razvojem samih baterija.

Prilikom planiranja infrastrukture potrebno je poduzeti korake koji se tiču planiranja mjesta postavljanja infrastrukture za punjenje baterija, kako bi se strateškim pozicioniranjem kroz veću ponudu usluga osiguralo i povećanje prihoda. Kod postavljanja punjača obavezno treba uzeti u obzir i rješavanje potencijalnih ekoloških zahtjeva. Sljedeći korak je ažuriranje plana rasporeda zračne luke (engl. *Airport Layout Plan – ALP*) kako bi se prikazala lokacija infrastrukture i druge izmjene vezane za osiguranje pristupa između uzletno-sletne staze i infrastrukture za punjenje baterija. Izgradnja infrastrukture podliježe svim zakonima i propisima kao i svi drugi građevinski radovi vezani za zračnu luku [41].

U sklopu planiranja infrastrukture za punjenje baterija važno je odgovoriti na pitanja o mogućnostima koje tehnologija za električne zrakoplove može ponuditi, potencijalnim potrebama električnih zrakoplova koji će koristiti infrastrukturu, te kada je potrebno i moguće izgraditi potrebnu infrastrukturu. Jednako važno je odgovoriti tko će investirati u infrastrukturu i na kraju tko će njome upravljati i opsluživati električne zrakoplove [42].

Sa operativne strane, najčešće se spominju dvije strategije punjenja baterija, zamjena baterija i *plug-in* punjenje baterija (prikazano na slici 12). Kod *plug-in* strategije zrakoplov se direktno spaja na punjač za baterije koji može biti fiksni ili mobilan. Ovakav sustav punjenja zahtjeva super brze i visokonaponske punjače koji će biti u mogućnosti opslužiti zrakoplove u zadanim vremenskim okvirima od trideset do pedeset minuta. Strategija zamjene baterija je strategija kod koje se prazne baterije zrakoplova mijenjaju s punima baterijama. Kod ove

strategije se pretpostavlja da je broj baterija u stanici za zamjenu baterija uvijek isti, te se one klasificiraju u četiri različite kategorije: pune, prazne, u punjenju i u pražnjenju. Iz sigurnosnih razloga, zamjena baterija bi trebala biti odrađena u sklopu operacija utovara, deset minuta nakon što se iskrcaju svi putnici iz zrakoplova [43].



Slika 12. Dvije strategije punjenja baterije

Izvor: [43]

S ciljem dodatnog smanjenja CO2 predlaže se postavljanje dodatnih izvora održive energije na zračnim lukama. Solarni fotonaponski sustav je jedan od najčešće korištenih izvora energije koji služi za napajanje raznih sustava na mnogobrojnim zračnim lukama i kojeg je moguće spojiti na infrastrukturu za punjenje baterija. Dodatna strategija koja se u zadnje vrijeme spominje je engl. *Aviation to Grid* – A2G koncept, koji predstavlja dvosmjernu izmjenu električne energije između elektroenergetske mreže i izvora energije na zračnoj luci, poput solarnog fotonaponskog sustava, sustava za punjenje baterija i samih baterija. Ovaj koncept je primjenjiv na obje ranije navedene strategije punjenja baterija, temelji se na principu ponude i potražnje, te omogućuje kvalitetnije korištenje ukupne energije [43].

Prvi punjač baterija za zrakoplove koji podržava A2G koncept, a ujedno i prvi odobreni punjač od strane EASA-e je punjač *Skycharge* (prikazan na slici 13), kojeg su napravile kompanije Green Motion (sada dio kompanije Eaton) i Pipistrelv (sada dio kompanije Textron). Ovaj punjač se nalazi u upotrebi od 2021. godine, postiže učinkovitost od 96% uz izlaznu snagu od 22 kW i može biti fiksni ili mobilan [44].



Slika 13. Prvi punjač baterija za zrakoplove (fiksni i mobilni)
Izvor: [44]

4. KOMPARATIVNA ANALIZA PRIMJENE ALTERNATIVNIH I KONVENCIONALNIH IZVORA ENERGIJE

Fosilna goriva na bazi kerozina čine više od 99% zrakoplovnog goriva koje se danas koristi. Ova goriva štete okolišu rezultirajući emisijama, od proizvodnje do uporabe. Kako bi smanjila štetni utjecaj na okoliš, zrakoplovna industrija se okreće alternativnim opcijama. Alternativni izvori energije smatraju se učinkovitim inicijativama za dekarbonizaciju cijele zračne industrije, ali se još moraju istražiti i usavršiti [19].

4.1. Održiva zrakoplovna goriva

SAF se proizvodi od biljaka, korištenog bio ulja i ulja za kuhanje, te iako pokreću mnoge motore, troškovi proizvodnje i manjak opskrbe su velika prepreka. Kako bi smanjili ugljični otisak, proizvođači zrakoplova moraju ubrzati prijelaz na održiva goriva [19].

Izgaranje SAF-a i konvencionalnih goriva emitiraju slične količine CO₂, ali SAF pruža korist za okoliš na temelju životnog ciklusa. Životni ciklus goriva se sastoji od više koraka, od sirovine do konačne upotrebe u motoru. U svakom će koraku (poput uporabe, obrade ili transporta goriva) biti proizvedene emisije stakleničkih plinova, te se u procjeni životnog ciklusa ukupni ugljični otisak goriva dobiva zbrajanjem svih tih emisija zajedno. Kada se uzmu u obzir sve te emisije, SAF rezultira smanjenjem emisija u usporedbi s osnovnom vrijednošću životnog ciklusa mlaznog goriva (89g CO₂e/MJ). Smanjenje emisija varira ovisno o sirovini, tehnologiji pretvorbe i proizvodnji, logistici ili pak korištenju zemljišta [30].

Kada se koristi biomasa za razvoj SAF-a, biljke tijekom fotosinteze apsorbiraju CO₂ u relativno kratkom vremenu. Tijekom izgaranja, ugljik se emitira nazad u atmosferu i vraća se natrag u biljke u zatvorenom krugu. U ovom scenariju, u idealnom slučaju, u biosferu se ne bi ispuštao dodatan ugljik, kao što bi to bilo s tradicionalnim metodama. Kada se industrijski otpadni plinovi ili MSW koriste za proizvodnju SAF-a, smanjenje emisija dolazi od višestruke upotrebe fosilnog ugljika [30].

4.2. Vodik

Za razliku od kerozina, vodik ne ispušta nikakve emisije ugljika. Vodik je tehnologija visokog potencijala, koji ima specifičnu energiju po jedinici mase otprilike tri puta veću od kerozina, te ima manju gustoću energije u određenom volumenu u odnosu na kerozin [33].

Da bi se preletjela ista udaljenost, u zrakoplovu je potreban veći spremnik za gorivo u odnosu na volumen spremnika za postojeća mlazna goriva. S trenutnim volumenima spremnika goriva, letovi bi mogli biti samo na vrlo kratkim relacijama [31]. S obzirom da je potreban veći spremnik za gorivo, vizualni izgled budućih zrakoplova vjerojatno će se promijeniti [33].

Pri projektiranju i radu zračnih luka s pogonom na vodik, trebalo bi uzeti u obzir i njegova druga svojstva koja su različita od kerozina. Primjerice, vodik u plinovitom stanju je bezbojan,

bez mirisa, okusa, nije toksičan, a gori nevidljivim plavkastim plamenom i lako se zapali, to jest teško je uočiti i plin i plamen. Tekući vodik ne gori, ali ako se izlije, tekućina isparava i pretvara se u plinoviti vodik. Tekući vodik i njegovo kriogeno isparavanje mogu uzrokovati opekline od hladnoće u dodiru s kožom osobe (detaljnija usporedba mlaznog goriva i kriogenog vodika opisana u tablici 3) [32].

Tablica 3. Usporedba karakteristika mlaznog goriva i kriogenog vodika

Karakteristike	Jet A-1 (kerozin)	Kriogeni vodik, LH	Implikacije
Točka vrenja (°C)	167 -266	-253	Smrztine, isparavanje vodika, krhkost materijala
Granica zapaljivosti (%)	0,6-4,7	4,0-75,0	Velika vjerojatnost požara vodika, ali veća koncentracija potrebna za pokretanje
Minimalna energija paljenja (mJ)	0,25	0,02	Velika vjerojatnost požara vodika sa slabom iskrom
Brzina gorenja (cm/s)	18	265-325	Vatra vodika bi brže gorila od vatre kerozina
Plovnost	-	14x lakši od zraka, raste brzinom od 20 m/s	Plinoviti vodik brzo se raspršuje
Temperatura samozapaljenja (°C)	210	585	Teže se zapali čistom toplinom
Udio zračenja topline vatre	30-40%	10-20%	Vodikovi požari mogu biti manje razorni jer zrače manje topline, ali su prisutni izazovi zbog nevidljivog plamena

Izvor: [32]

Dodatno, uz navedene karakteristike u tablici 3, u tablici 4 su prikazane su razlike između kerozina i kriogenog vodika koje su bitne za okruženje u zračnoj luci.

Tablica 4. Usporedba kerozina i vodika u okruženju zračne luke

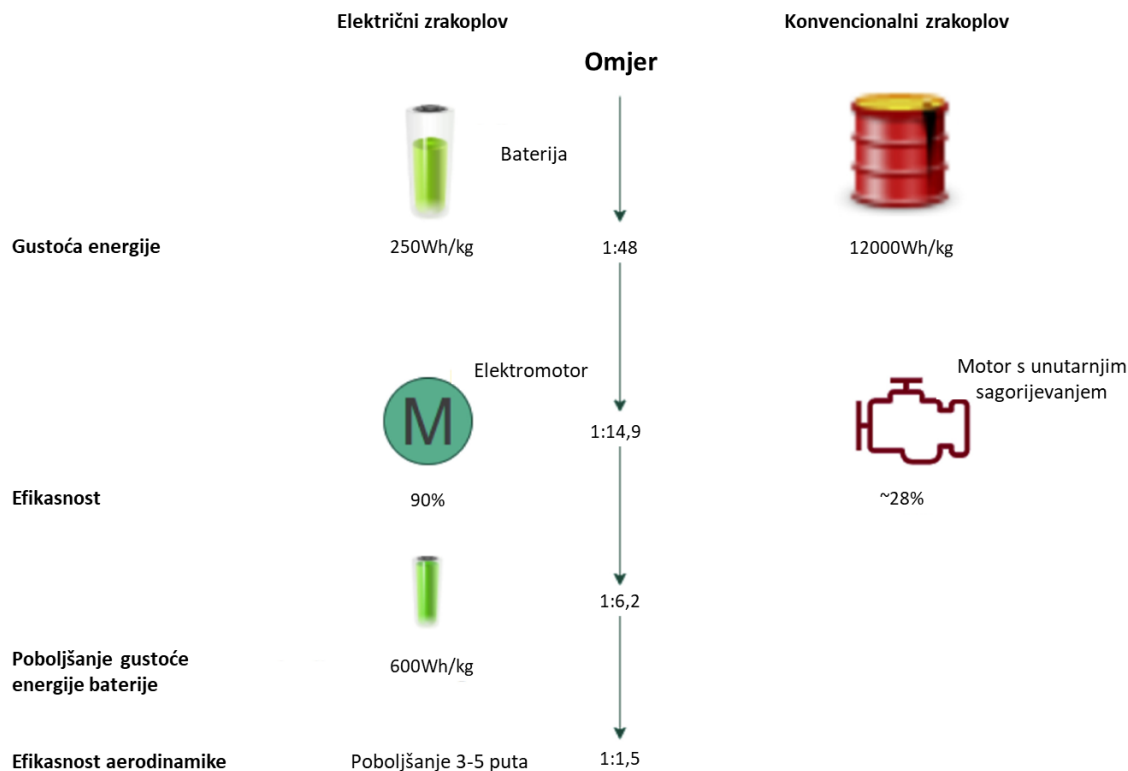
Parametar	Jet A-1 (kerozin)	Kriogeni vodik, LH
Temperatura skladištenja	Ambijentalna	minus 253°C / 20 K
Raspon zapaljivosti u zraku	0,6-4,7% volumena	4,0-75% volumena
CO2 u ispušnim emisijama	Da	Ne
Udaljenost sigurne zone goriva (2021. godina)	3 m	30-60 m (s vremenom se smanjuje)
Udaljenost sigurne zone goriva (2023. godina+)	3 m	20 m tijekom spajanja/isključivanja, 8 m tijekom protoka goriva
Simultani ukrcaj i punjenje goriva (2021. godina)	Da	Ne
Tipična gustoća mase (kg/m ³)	775-850 kg/m ³	71 kg/m ³
Cijev za gorivo (veličina crijeva)	3"	4"-6"
Cijev za gorivo (rukovanje)	Ručno	Automatizirano
Mjesto za punjenje goriva	Na pristaništu	Izvan pristaništa (<2023.godine) Na pristaništu (>2023. godine)

Izvor: [32]

Prijelaz zrakoplova s kerozina na vodik povećat će potražnju za obnovljivom energijom, pod pretpostavkom da se vodik proizvodi elektrolizom. Ova povećana potražnja se ne odnosi samo na izravnu upotrebu vodika, već i na baterijske električne zrakoplove i SAF [32].

4.3. Električna energija i baterije

Kao odgovor na klimatske promjene, korištenje električne energije u zračnom prometu izaziva sve veći interes na globalnom nivou. Na slici 14 prikazana je usporedba učinkovitosti između pogonskih goriva električnog i konvencionalnog zrakoplova. Jasno se iščitava izuzetno velika razlika u gustoći energije, koja u prosjeku za suvremene Li-ion baterije iznosi 250 Wh/kg, dok je gustoća energije mlaznog goriva četrdeset osam puta veća, odnosno 12000 Wh/kg. Uzimajući u obzir učinkovitost elektromotora od 90% u odnosu na 28%, koliko iznosi učinkovitost motora s unutarnjim izgaranjem, omjer se smanjuje na 1:15. Uz predviđeni rast prosječne gustoće energije baterije, koja bi kroz nekoliko godina trebala biti 600 Wh/kg, razlika se dodatno smanjuje na omjer 1:6,2. Kao bitan čimbenik potrebno je u obzir uzeti i aerodinamiku zrakoplova. Aerodinamika kod električnog zrakoplova nudi dodatne učinkovite mogućnosti, poput tehnologije distribuiranog pogona i tehnologije usisavanja graničnog sloja strujanja zraka, kojima je moguće smanjiti potrošnju energije za vrijeme leta. Prosječni faktor smanjenja potrošnje energije zbog poboljšanja aerodinamike iznosi četiri, što u konačnici dovodi do omjera od 1:1,5 [45].



Slika 14. Usporedba učinkovitosti između pogonskih goriva električnog i konvencionalnog zrakoplova
Izvor: [45]

Analizirajući operativni trošak leta električnih zrakoplova u odnosu na klasične zrakoplove sličnih proporcija, prema kompaniji Eviation, električni zrakoplov Eviation Alice, u odnosu na klasične zrakoplove Cessnu 402 ili Pilatus PC-12, u prosjeku ima četiri puta manji trošak leta po satu [46]. Što se tiče emisija ispušnih plinova kao jednog od najbitnijih faktora prilikom izbora alternativnih goriva, električni zrakoplovi emitiraju 90% manje emisija nego mlazna goriva koja se trenutno nalaze u upotrebi [47]. Nadalje, utjecaj temperature ima negativan učinak na performanse elektromotora, to jest javlja se problem zagrijavanja baterija i motora [46].

Prema *startup* kompaniji za električne zrakoplove Ampaire, električni zrakoplov u odnosu na konvencionalni zrakoplov može imati 90% manje troškove goriva i 50% manje troškove održavanja. Osim financijskog benefita, električni zrakoplovi nemaju emisija ispušnih plinova te su u odnosu na konvencionalne zrakoplove 66% tiši prilikom slijetanja i uzlijetanja [48].

Težina baterija je najveći problem električnog zrakoplova (prikaz baterije na slici 15). Baterije moraju biti velike kako bi odgovarale gustoći zrakoplovnog goriva. Time se dolazi do cikličkog problema koji se pokušava riješiti – velike i teške baterije dovode do toga da zrakoplov teško može poletjeti i ostati u letu; što više energije treba zrakoplovu, to je više baterija potrebno; što je zrakoplov teži, potrebno je više energije i baterija. Da bi se uopće

razmišljalo o širokoj rasprostranjenosti električnih zrakoplova (pogotovo onih većih), potrebne su manje, lakše i gušće baterije [37].



Slika 15. Baterija za NASA-in zrakoplov X-57 Maxwell
Izvor: [49]

5. PRIMJENA ALTERNATIVNIH GORIVA U INDUSTRIJI ZRAČNOG PROMETA

Prva generacija alternativnih goriva, zvana biogoriva, proizvode se od biomase (primjerice usjeva), koji osim smanjenja ugljika, mogu biti predmet dodatnih pitanja održivosti. Međutim, trenutna tehnologija omogućuje proizvodnju goriva iz neprehrambene biomase (poput komunalnog otpada, ulja za kuhanje i poljoprivrednih ostataka). Uz manju ovisnost o određenim prirodnim resursima ili dostupnosti zemljišta, ova raznovrsnost sirovina SAF-a olakšava proizvodnju i omogućava uspostavu SAF industrije u različitim zemljama (bilo u razvijenim ili onima u razvoju), čak i bliže zračnim lukama, što utječe na smanjenje troškova transporta goriva [30].

5.1. Primjena održivih zrakoplovnih goriva

Cilj zrakoplovne industrije usmjeren je na maksimalno smanjenje emisija na izvoru korištenjem SAF-a ili novih tehnologija. S obzirom na već odobrenih jedanaest procesa pretvorbe (i još jedanaest procesa pretvorbe u odobrenju), SAF je globalno dostupan, te se nudi na zračnim lukama diljem svijeta. Niže su navedeni primjeri SAF-a u praksi i glavne prekretnice [50]:

- Godina 2008. – prvi probni let s biogorivom, Virgin Atlantic.
- Od 2011. do 2015. godine – više od 2500 komercijalnih putničkih letova (dvadeset i dva zrakoplovna prijevoznika), s mješavinama do 50% biogoriva iz sirovina, poput ulja za kuhanje, kamelina, algi, šećerne trske i jatrofa.
- Siječanj 2016. godine – zračna luka Oslo uvela je redovitu opskrbu održivim gorivom kroz hidrantski sustav.
- Ožujak 2016. godine – United Airlines postao prva zrakoplovna kompanija koja je uvela SAF u normalno poslovanje (dnevni letovi iz zračne luke LAX, Los Angelesa, SAD).
- Lipanj 2017. godine – na 73. IATA AGM okupljanju u Cancunu u Mexicu, članovi su jednoglasno prihvatili rezoluciju o raspoređivanju SAF-a, pozivajući na konstruktivne vladine politike i mjere da se koriste samo goriva koja su povoljnija za ekološku ravnotežu i izbjegavaju iscrpljivanje prirodnih resursa.
- Studeni 2019. godine – više od četrdeset i pet zračnih prijevoznika koristi SAF u komercijalnim letovima (više od 250 tisuća letova).
- Listopad 2021. godine – na 77. IATA AGM u Bostonu, SAD, odobrili su rezoluciju međunarodne zračne industrije s ciljem postizanja nula karbon emisija do 2050. godine. Ova je odluka usklađena s ciljem Pariškog sporazuma – ograničavanje globalnog zatopljenja ispod 2 stupnja Celzijusa.
- Listopad 2022. godine – usvajanje dugoročnog aspiracijskog cilja (engl. *Long Term Aspirational Goal* – LTAG) za postizanje nula emisija CO₂ do 2050. godine na 41. ICAO skupštini; proizvodnja SAF-a 300 milijuna litara.
- Lipanj 2023. godine – IATA je izdala kritične točke za postizanje nule emisija CO₂ do 2050. godine, uključujući SAF.

- Listopad 2023. godine – EU je usvojila *ReFuelEU Aviation* propis prema kojemu će dobavljači goriva za zrakoplove morati miješati sve veće količine SAF-a s kerozinom, počevši s minimalnom mješavinom od 2% (2025. godine), do 70% u 2050. godini.
- Godina 2023. – proizvodnja SAF-a se utrostručila na 600 milijuna litara (usporedno s 2022. godinom i 300 milijuna litara), predstavljajući 0,2% globalne potrošnje mlaznog goriva.
- Studeni 2024. godine – ICAO CAAF/3 dogovorio je globalan okvir za promicanje proizvodnje SAF-a u svim geografskim područjima međunarodnog zrakoplovstva na 5% manje emisija ugljika do 2030. godine, korištenjem SAF-a.

5.2. Primjena vodika

Posljednjih su se nekoliko godina značajno povećala istraživanja vodika kao potencijalnog nositelja energije za pogon budućih zrakoplova s nultom stopom emisija. Put do zrakoplova s pogonom na vodik nije lak, te zahtijeva značajan napor u cijeloj zrakoplovnoj industriji, ali i izvan nje. Zrakoplovna industrija se suočava s velikim izazovima – od infrastrukture, skladištenja vodika i cijene, do percepcije javnosti o sigurnosti, a paralelno radi na sazrijevanju tehnologije [51].

Zrakoplovni inženjeri će morati preuzeti tehnologije razvijene u automobilskoj i svemirskoj industriji, te ju prilagoditi operacijama komercijalnih zrakoplova, posebno se fokusirajući na smanjenje težine i troškova. Prije nego zrakoplovi na vodik polete, cijela će industrija morati postići iste ili pak bolje sigurnosne ciljeve od onih koji su postignuti s postojećim komercijalnim zrakoplovima [51].

Do 2035. godine, Airbus ima ambiciju predstaviti prvi komercijalni zrakoplov na vodik. Da to postignu, njihov projekt ZEROe istražuje razne tehnologije, konfiguracije i ekosustav koji će proizvoditi i opskrbljivati vodik. Airbus razvija četiri ZEROe koncepta koja pokreću vodik, koristeći dvije metode [52]:

- U slučaju metode izgaranja vodika, plinske turbine s modificiranim sustavima goriva i mlaznicama za gorivo pokreću se vodikom na sličan način na koji se danas pokreću zrakoplovi.
- Vodikove gorive ćelije, druga je metoda koja stvara električnu energiju koja pokreće električne motore, koji okreću propeler ili ventilator. U odnosu na današnje pogonske sustave, ovaj potpuno električni pogonski sustav sasvim je drugačiji.

Postoje različite podjele ZEROe koncepta zrakoplova kako slijedi [52]:

- Turbofan (domet 2000+ nm, broj putnika: <200) – potisak daju dva hibridna turboventilatorska motora na vodik. Sustav za skladištenje i distribuciju tekućeg vodika nalazi se iza stražnje tlačne pregrade.
- Turboprop (domet 1000+ nm, broj putnika: <100) – potisak daju dva hibridna turboprop motora na vodik, koji pokreću osmokrake propelere. Sustav za skladištenje i distribuciju vodika, isto kao i kod Turbofana, nalazi se iza stražnje tlačne pregrade.

- Zrakoplov engl. *Blended-Wing Body* – BWB (domet 2000+ nm, broj putnika: <200) – izuzetno široka unutrašnjost karoserije BWB zrakoplova (prikazan na slici 16) daje više mogućnosti za skladištenje i distribuciju vodika. U ovom konceptu spremnici tekućeg vodika nalaze se ispod krila. Potisak ovakvom zrakoplovu daju dva hibridna turboventilatorska motora na vodik.
- Potpuno električni koncept (domet 1000 nm, broj putnika: <100) – ovaj se koncept temelji na potpuno električnom pogonskom sustavu koji pokreću gorive ćelije.



Slika 16. Airbus ZEROe Blended-Wing Body zrakoplov

Izvor: [52]

U nastavku su navedeni neki od primjera korištenja vodika u zrakoplovnoj industriji do danas:

- Rujan 2020. godina, Velika Britanija – testni zrakoplov Piper M-klase kompanije ZeroAvia, prvi je zrakoplov komercijalne veličine, sa šest sjedala, koji je letio vodikovom gorivom ćelijom [53].
- Lipanj 2021. godina, Francuska – Airbus, Air Liquide i grupacija ADP potpisali su Memorandum o razumijevanju (engl. *Memorandum of Understanding* – MoU) s kojim su u pripremi zračnih luka u Parizu za eru vodika i prvog komercijalnog zrakoplova s pogonom na vodik do 2035. godine. Plan je razviti studiju s trideset zračnih luka diljem svijeta s ciljem procjene potencijalne konfiguracije za proizvodnju, opskrbu i distribuciju tekućeg vodika, te izgraditi detaljan plan za dvije zračne luke Paris – Charles de Gaulle i Paris-Orly [54].
- Rujan 2021. godina, Francuska – Airbus, Air Liquide i kompanija VINCI Airports, tri vodeće kompanije u industriji zračnih luka, zrakoplova i vodika, zajedno rade na izgradnji europske mreže zračnih luka za prihvat budućih zrakoplova na vodik. Kao centar izvrsnosti za inovacije kompanije VINCI Airports, zračna luka Lyon-Saint

Exupery, Francuska, odabrana je kao pilot zračna luka, u kojoj će od 2023. godine biti prve instalacije. Projekt ima nekoliko faza: prva faza je ključna za testiranje zračne luke i dinamike, s ciljem postavljanja stanice za distribuciju plinovitog vodika u zračnoj luci, koja služi i za opskrbljivanje kopnenih vozila zračne luke, od 2023. godine. Između 2023. i 2030. godine plan je omogućiti dopremanje vodika u spremnike budućih zrakoplova postavljanjem infrastrukture za tekući vodik. Nakon 2030. godine u planu je razviti vodikovu infrastrukturu od proizvodnje do masovne distribucije tekućeg vodika u zračnoj luci [55].

- Prosinac 2021. godina, Kanada – kompanija De Havilland i ZeroAvia potpisali su MoU za razvoj programa vodikovo-električnih motora za zrakoplove Dash 8-400 [57].
- Lipanj 2022. godina, Njemačka – Airbus i Linde, globalna vodeća kompanija za industrijske plinove i inženjering, potpisali su MoU za rad na razvoju vodikove infrastrukture u zračnim lukama diljem svijeta. Prema memorandumu, od početka 2023. godine, obje će kompanije pokrenuti pilot projekte u nekoliko zračnih luka [58].
- Lipanj 2022. godina, Japan – Airbus i kompanija Kansai Airports potpisali su MoU za istraživanje upotrebe vodika u tri zračne luke u Japanu [58].
- Siječanj 2023. godina, Velika Britanija – u sklopu projekta HyFlyer II, zrakoplov Dornier 228 s devetnaest sjedala, kompanije ZeroAvia, poletio je opremljen prototipom vodikovo-električnog pogonskog sklopa pune veličine na lijevom krilu zrakoplova, te je let trajao šest minuta [59].
- Ožujak 2023. godina, SAD – šest tjedana nakon leta zrakoplova Dornier 288, testni zrakoplov Dash 8-300 s turbopropom, kompanije Universal Hydrogen, iako nije bio prvi, ali je bio najveći zrakoplov na vodikove ćelije (za četrdeset putnika), letio je petnaest minuta, te dosegao visinu od 3500 stopa [60].

5.3. Primjena električne energije u zračnom prometu

Oblikovanje budućnosti bez ugljika zahtjeva razvoj i dizajn zrakoplovne tehnologije pokretane čistom energijom. Iako nije novost, koncept korištenja električne energije kao pogonskog goriva u zrakoplovima se još uvijek nalazi u ranoj fazi razvoja te se susreće s mnogim izazovima. Najveći izazov za veću elektrifikaciju zračnog prometa trenutno predstavlja ograničeni energetska kapacitet baterija, zbog čega se elektrifikacija zrakoplova danas uglavnom odnosi na manje zrakoplove sa malim dometom. Mogućnost elektrifikacije zrakoplovstva za širu komercijalnu upotrebu će ovisiti o razvoju novih, poboljšanih vrsta baterija s većom gustoćom energije. Za osiguranje cjelovite ekološke tranzicije zračnog prometa prema elektrifikaciji, od iznimne će važnosti biti održivost lanca opskrbe baterijama, od eksploatacije sirovina do zbrinjavanja istrošenih baterija [61].

Iako je tehnologija baterija još uvijek u razvoju, te trenutno nije dovoljna za komercijalne letove kakve znamo, električni zrakoplovi danas su već poznati, od probnih letova i treninga, do letova na kratke relacije. Kompanije koje se bave baterijama, poput Amprius-a, usredotočeni su na stalna poboljšanja baterija [38].

Razvoj električnih zrakoplova se naziva i „Treća revolucija u zrakoplovstvu“. Podatak da je samo u rasponu od 2016. do 2022. godine u cijelom svijetu bilo dvije stotine *startup* kompanija i tri stotine projekata vezanih za električne zrakoplove, najbolje govori o interesu i važnosti elektrifikacije zrakoplovstva. Dalje u radu su navedeni neki od događaja važnih za razvoj električnih zrakoplova [18].

- Prvi let zrakoplova na električni pogon dogodio se prije više od sto četrdeset godina kada su braća Tissandier 1883. godine u Parizu izvela uspješan let s balonom pogonjenim električnim motorom [62].
- Godine 1973. Fred Militky i Heino Brditschka su preradili motornu jedrilicu HB-3 u električni zrakoplov, kojim je ostvaren prvi let električnim zrakoplovom težim od zraka s posadom. Za let koji je trajao 12 minuta na visini od 300 metara je korišten Bosch-ov električni motor i Vartine Ni-Cd baterije [62].
- U lipnju 2020. godine, zrakoplov Velis Electro, kompanije Pipistrel, postaje prvi na svijetu certificirani potpuno električni zrakoplov. Velis Electro je električni zrakoplov s dva sjedala koji služi za trening i obuku pilota za vizualan režim leta (engl. *Visual Flight Rules* – VFR). Velis Electro s nula emisija štetnih plinova, razinom buke od 60 dB, te niskim operativnim troškovima predstavlja koncept održivog zrakoplova [63].
- Zrakoplov Eviation Alice (prikazan na slici 17) je prvi električni zrakoplov namijenjen za prigradske i teretne letove. Svoj prvi let Eviation Alice je imao u rujnu 2022. godine kada je u zraku proveo osam minuta dosegavši visinu od 1067 metara i maksimalnu brzinu od 272 km/h. Zrakoplov je pogonjen s dva elektromotora magniX650, očekivana maksimalna brzina je 480 km/h, a dolet između 240 i 400 kilometara. Ovisno o budućem poboljšanju performansi baterija, dolet može i rasti. Certifikacija Eviation Alice-a se očekuje 2025. godine, a prvi zrakoplovi bi kupcima trebali biti isporučeni 2027. godine [65].
- MagniX je kompanija koja svojim električnim motorima pokreće električnu revoluciju u zračnom prometu. Uz već spomenuti Eviation Alice, njihovi električni motori su do sada već pokretali najveći zrakoplov na vodik De Havilland Dash 8 i električni zrakoplov eBeaver. U suradnji sa zrakoplovnim prijevoznikom Harbour Air su ušli u povijest kada su 2019. godine sa eBeaver-om, koji je u biti De Havilland DHC-2 Beaver prerađen sa jakim magniX-ovim električnim motorom, izveli prvi komercijalni let sa potpuno električnim motorom [66].
- Wright je kompanija koja u suradnji sa mnogim institucijama i kompanijama, kao što su NASA, američka vojska, Honeywell i easyJet, radi na razvoju električnih pogonskih sustava. Njihov fokus je na elektrifikaciji zrakoplova za jednosatne letove sa sto putnika [67].



Slika 17. Zrakoplov Eviation Alice

Izvor: [64]

Osim električnih zrakoplova, važno je spomenuti i zračne luke diljem svijeta koje s ciljem smanjenja CO₂ razvijaju vlastite projekte za dobivanje električne struje iz obnovljivih izvora energije. Na razvoj takvih projekata najčešće utječu faktori poput lokacije zračne luke i dostupnih resursa koje je moguće iskoristiti. Kod razmatranja opcija obnovljive energije, zračne luke moraju napraviti određene analize za određivanje i definiranje projekta, koncepta, te lokacije. Taj proces se odvija u četiri glavna koraka [68]:

- definiranje cilja projekta,
- identificiranje regulatornih prilika i prepreka,
- evaluacija specifičnih uvjeta vezanih za lokaciju, klimu, veličinu i druge čimbenike,
- analiza tehničkih kriterija, na temelju prikupljenih podataka u prethodnim koracima.

Neki od primjera zračnih luka koje su uspješno provele projekte dobivanja električne energije iz obnovljivih izvora energije su [68]:

- Međunarodna zračna luka Kansai u Osaki je razvila nekoliko projekata za dobivanje električne struje iz obnovljivih izvora. Kansai godišnje dobiva otprilike 12 milijuna kWh električne energije iz dva solarna sustava koji su postavljeni 2014. godine. Jedan sustav je smješten na uzletno-sletnoj stazi, a drugi na skladištu za teret. Godine 2015. je postavljen sustav vjetroturbina koji se uglavnom koristi za napajanje rasvjete ili kao struja za hitne slučajeve. Sustav se sastoji od dvije vjetroturbine Zephyr9000 uparene sa baterijom od 50 kWh. Svaka vjetroturbina pri srednjoj brzini vjetra od 5 m/s proizvede 8809 kWh struje godišnje.
- Za zračnu luku Seymour, u vlasništvu argentinske kompanije Ecogal S.A., smještenu u arhipelagu Galapagosa, smatra se da je jedina zračna luka na svijetu koja radi isključivo

na energiju sunca i vjetra. Iz solarnih fotonaponskih panela koji su postavljeni na stazama terminala, zračna luka dobiva 35% energije, dok 65% energije dolazi iz generatora vjetroturbina (engl. *Wind Turbine Generators* – WTG). Na otoku postoje tri WTG-a od 750 kW, koji opskrbljuju zračnu luku i grad Puerto Ayora električnom energijom. Zgrada terminala zračne luke otvorena je 2012. godine, te je izgrađena od recikliranih i održivih materijala.

6. ZAKLJUČAK

Zračni promet kao jedna od najbrže rastućih industrija ima veliki utjecaj na zagađenje okoliša koje se očituje u stvaranju emisija ispušnih plinova, buke, otpada i zagađenjem tla. Na zagađenje okoliša u zračnom prometu, kroz razne procese i aktivnosti djeluju svi sudionici od korisnika do pružatelja usluga.

S obzirom na tendenciju povećanja broja letova i prijeđenih kilometara, a samim time i većim utjecajem na okoliš, pred zrakoplovnu industriju postavlja se zahtjev za poduzimanjem mjera s ciljem stvaranja održivog zračnog prometa. Kako bi mjere bile učinkovite potrebno je redovito raditi analize budućih ekoloških trendova i zatim mjerama djelovati na različita područja, od tržišta preko tehnologije, sve do korištenja održivih izvora energije.

Fosilna goriva su, kao glavni pokretač klimatskih promjena, pod sve većim povećalom javnosti, te se za njih traže održive alternative. Budući da se na goriva u zračnom prometu primjenjuju visoki standardi vezani za sigurnost i kvalitetu, pred zračnom industrijom stoji težak zadatak kako razviti i primijeniti alternativna goriva. Prilikom evaluacije potencijalnog alternativnog goriva potrebno je uzeti u obzir pravne, ekološke, tehnološke i infrastrukturne okvire. Kod infrastrukture bitan element predstavlja kompatibilnost alternativnog goriva s postojećom infrastrukturom ili je nužna izgradnja dodatne i potencijalno skupe infrastrukture. Po tom pitanju, SAF predstavlja savršenu alternativu konvencionalnom zrakoplovnom gorivu. Iako i SAF stvara CO₂ jednako kao i konvencionalno gorivo, kada se uzme u obzir iskorištavanje otpada u procesu proizvodnje, te njegov čitavi životni ciklus kod proizvodnje iz biomase, zatvara se CO₂ krug. Kada bi se omjer miješanja SAF sa trenutnih 50% povećao na 100% osiguralo bi se značajno smanjenje ugljičnog otiska. Međutim, to dovodi do glavne mane ovog goriva, a to je manjak sirovina za njegovu proizvodnju, zbog čega će SAF kao gorivo najvjerojatnije biti prijelazno rješenje do pojave novih održivih alternativnih goriva.

Vodik zbog svoje rasprostranjenosti i visoke specifične energije se također razmatra kao potencijalna alternativa. Dodatan razlog za razmatranje goriva od vodika se nalazi u činjenici da ovo gorivo ne stvara CO₂ prilikom korištenja niti prilikom same proizvodnje. Zbog male gustoće po volumenu zahtjeva veće spremnike goriva, te bi bio primjenjiv samo na kraćim letovima. Vodik kao gorivo je zahtjevno za manipulaciju, te su potrebna dodatna ulaganja u infrastrukturu. Potencijalno rješenje je moguće u vidu hibridnih zrakoplova koja bi, uz konvencionalno gorivo koristili i gorivo dobiveno iz vodika, čime bi bio smanjen ugljični otisak.

Električna energija i električni zrakoplovi, osim što predstavljaju alternativu konvencionalnom gorivu i zrakoplovstvu u zadnjih nekoliko godina, postaju sve atraktivniji i privlače sve više investitora. Za vrijeme leta, električni motori ne proizvode emisije štetnih plinova, te stvaraju i manje buke. Osim navedenog, električni motori su puno efikasniji i operativni troškovi po satu leta su puno niži nego kod konvencionalnih zrakoplova. Najveći problem električnih zrakoplova je mala gustoća energije baterija zbog čega je njihova upotreba

trenutno ograničena na manje zrakoplove i na manje udaljenosti. Do razvoja i izuma nove poboljšane baterije, razmatraju se i razvijaju rješenja u vidu hibridnih zrakoplova.

Uz razvoj alternativnih goriva za zrakoplove, paralelno se i zračne luke sve više okreću održivom poslovanju i korištenju alternativnih izvora energije. Kroz razne projekte diljem svijeta zračne luke se uspješno prilagođavaju okruženju i razvijaju se koncepti za korištenje energije iz obnovljivih izvora s ciljem smanjenja negativnog utjecaja na okoliš.

Zrakoplovna industrija je kroz svoju povijest uvijek napredovala i bila pokretač pozitivnih promjena. Pred zračnom industrijom se i dalje nalaze izazovi kako unaprijediti i iskoristiti potencijale alternativnih izvora energije, a s ciljem smanjenja emisija ispušnih plinova i smanjenja zagađenja. Efikasno iskorištavanje tih potencijala bit će moguće jedino uz nastavak istraživanja i razvoja novih tehnologija, uz usklađenost sa zakonskim i sigurnosnim regulativama. Za to će biti potreban holistički pristup i uključenost svih dionika u zračnom prometu i industriji.

POPIS LITERATURE

1. Golubić J. *Promet i okoliš*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu; 2006.
2. Štimac I. *Osnove aerodroma*. [Utjecaj aerodromskog prometa na okoliš] Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 2023.
3. Agencija Europske Unije za sigurnost zračnog prometa (EASA). *Izješće o okolišu europskog zrakoplovstva 2022. Izvršni sažetak i preporuke*. 2022. Preuzeto s: [EnvironmentalReport_EASA_summary_HR_14-online.pdf \(europa.eu\)](#) [Pristupljeno: 15. travnja 2024.]
4. Aviation Environment Federation. *Aircraft noise – a long standing problem*. Preuzeto s: [Aircraft noise - Aviation Environment Federation Aviation Environment Federation \(aef.org.uk\)](#) [Pristupljeno: 15. travnja 2024.]
5. The International Civil Aviation Organization. *Reduction of Noise at Source*. Preuzeto s: [Reduction of Noise at Source \(icao.int\)](#) [Pristupljeno: 15. travnja 2024.]
6. Akatsuka J, Ishii T. System Noise Assessment and Uncertainty Analysis of a Conceptual Supersonic Aircraft. *Aerospace*. 2022;9(4): 212. Preuzeto s: <https://doi.org/10.3390/aerospace9040212> [Pristupljeno 27. travnja 2024.]
7. EASA. *Aviation Environmental Impacts*. Preuzeto s: [Aviation Environmental Impacts | EASA Eco \(europa.eu\)](#) [Pristupljeno: 15. travnja 2024.]
8. Pavlin S. *Aerodromi*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu; 2006.
9. IATA Innovation Hub. *Empowering Your Journey: From End-to-End Sustainability to Elevated Travel Experiences*. Preuzeto s: https://www.iata.org/contentassets/c18c927e1d7641ddb019df4d8617924c/accelerate_sustainability_thought_piece.pdf [Pristupljeno: 17. travnja 2024.]
10. ICAO. *Waste Management at Airports (Eco Airport Toolkit)*. Preuzeto s: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Waste_Management_at_Airports_booklet.pdf [Pristupljeno: 16. travnja 2024.]
11. BBC News. *Climate change: Four things you can do about your carbon footprint*. Preuzeto s: [Climate change: Four things you can do about your carbon footprint \(bbc.com\)](#) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
12. EASA Light. *Izješće o okolišu u europskom zračnom prometu (EAER)*. Preuzeto s: [Izješće o okolišu u europskom zračnom prometu \(EAER\) - Pregled dosadašnjih i budućih scenarija zračnog prometa, buke i emisija | EASA \(europa.eu\)](#) [Pristupljeno: 15. travnja 2024.]
13. EASA. *Technology and Design*. Preuzeto s: [Technology and Design | EASA Eco \(europa.eu\)](#) [Pristupljeno: 15. travnja 2024.]

14. EASA. *Sustainable Aviation Fuels*. Preuzeto s: [Sustainable Aviation Fuels | EASA Eco \(europa.eu\)](#) [Pristupljeno: 15. travnja 2024.]
15. EASA. *Air Traffic Management and Operations*. Preuzeto s: [Air Traffic Management and Operations | EASA Eco \(europa.eu\)](#) [Pristupljeno: 15. travnja 2024.]
16. EASA. *Airports*. Preuzeto s: [Airports | EASA Eco \(europa.eu\)](#) [Pristupljeno: 15. travnja 2024.]
17. EASA. *Market-Based Measures*. Preuzeto s: [Market-Based Measures | EASA Eco \(europa.eu\)](#) [Pristupljeno: 15. travnja 2024.]
18. ICAO. *Innovation for a Green Transition, 2022 Environmental Report*. 2022. Preuzeto s: [ICAO ENV Report 2022 F4.pdf](#) [Pristupljeno: 14. travnja 2024.]
19. Simple Flying. *5 Alternative Fuel Technologies That Could Define Aviation's Race To Net-Zero*. Preuzeto s: <https://simpleflying.com/best-alternative-aviation-fuel-technologies-list/> [Pristupljeno: 17. travnja 2024.]
20. ICAO Secretariat. *ICAO Standards and Recommended Practices: Annex 16, Volume II*. Preuzeto s: [ENVReport2022_Art17.pdf \(icao.int\)](#) [Pristupljeno: 24. travnja 2024.]
21. CORSIA. *Leaflet CORSIA*. Preuzeto s: [Leaflet_CORSIA_Focal_Points.pdf \(icao.int\)](#) [Pristupljeno: 24. travnja 2024.]
22. European Council. *Fit for 55*. Preuzeto s: [Fit for 55 - The EU's plan for a green transition - Consilium \(europa.eu\)](#) [Pristupljeno: 24. travnja 2024.]
23. EU. *The European Green Deal*. Preuzeto s: [The European Green Deal - European Commission \(europa.eu\)](#) [Pristupljeno: 24. travnja 2024.]
24. Aviation Benefits Beyond Borders. *Waypoint 2050*. Preuzeto s: [Waypoint 2050 : Aviation: Benefits Beyond Borders \(aviationbenefits.org\)](#) [Pristupljeno: 24. travnja 2024.]
25. Hrvatski sabor. *Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine*. Preuzeto s: [Hrvatska strategija za vodik do 2050. godine \(nn.hr\)](#) [Pristupljeno: 24. travnja 2024.]
26. Republika Hrvatska. *Zakon o uspostavi infrastrukture za alternativna goriva*. Zagreb: Narodne Novine; 2022. Preuzeto s: <https://www.zakon.hr/z/891/Zakon-o-uspostavi-infrastrukture-za-alternativna-goriva> [Pristupljeno: 17. travnja 2024.]
27. ICAO. *Airports*. Preuzeto s: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/Airports.aspx> [Pristupljeno: 19. travnja 2024.]
28. ICAO. *SAF Feedstocks*. Preuzeto s: https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF_Feedstocks.aspx [Pristupljeno: 20. travnja 2024.]
29. ICAO. *SAF Conversion processes*. Preuzeto s: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx> [Pristupljeno: 19. travnja 2024.]
30. ICAO. *Sustainable Aviation Fuels Guide*. 2018. Preuzeto s: [41](https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-</div><div data-bbox=)

- [sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_vf.pdf](#) [Pristupljeno: 20. travnja 2024.]
31. EASA. *Vodik i njegov potencijal u zrakoplovstvu*. Preuzeto s: <https://www.easa.europa.eu/hr/light/topics/hydrogen-and-its-potential-aviation> [Pristupljeno: 22. travnja 2024.]
 32. Aerospace Technology Institute, Fly Zero. *Hydrogen Infrastructure and Operations – Airports, Airlines and Airspace*. Preuzeto s: [FZO-CST-POS-0035-Airports-Airlines-Airspace-Operations-and-Hydrogen-Infrastructure.pdf](#) [Pristupljeno: 25. travnja 2024.]
 33. Airbus. *Hydrogen*. Preuzeto s: [Hydrogen | Airbus](#) [Pristupljeno: 26. travnja 2024.]
 34. Sahoo S, Zhao X, Kyprianidis K. A Review of Concepts, Benefits, and Challenges for Future Electrical Propulsion-Based Aircraft. *Progress in Jet Engine Technology. Aerospace*. 2020;7(4):44. Preuzeto s: <https://doi.org/10.3390/aerospace7040044> [Pristupljeno: 20. travnja 2024.]
 35. NASA Glenn Research Centar. *Aircraft Configurations*. Preuzeto s: <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/airplane-concepts/aircraft-configurations/> [Pristupljeno: 20. travnja 2024.]
 36. GeekWire. *Zunum Aero picks Safran to build engine turbines for future hybrid electric aircraft*. Preuzeto s: [Zunum Aero picks Safran to build engines for hybrid electric aircraft \(geekwire.com\)](#) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
 37. Amprius. *The Future of Aviation: Sustainable Fuel vs Energy-Dense Batteries*. Preuzeto s: <https://amprius.com/aviation-safs-batteries/> [Pristupljeno: 24. travnja 2024.]
 38. Australian Academy of Science. *How a battery works*. Preuzeto s: <https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries> [Pristupljeno: 21. travnja 2024.]
 39. SKYbrary. *Aircraft Batteries*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/aircraft-batteries> [Pristupljeno: 22. travnja 2024.]
 40. Cox J, Harris T, Krah K, Morris J, Li X, Cary S. Impacts of Regional Air Mobility and Electrified Aircraft on Airport Electricity Infrastructure and Demand. *National Renewable Energy Laboratory*. 2023. Preuzeto s: [Impacts of Regional Air Mobility and Electrified Aircraft on Airport Electricity Infrastructure and Demand \(nrel.gov\)](#) [Pristupljeno: 22. travnja 2024.]
 41. Mead&Hunt. *Charging Infrastructure: Electrifying One Airport At A Time*. Preuzeto s: <https://meadhunt.com/charging-infrastructure/> [Pristupljeno: 25. travnja 2024.]
 42. ICF. *Putting the electric into electric aviation*. Preuzeto s: [Putting the electric into electric aviation | ICF](#) [Pristupljeno: 25. travnja 2024.]
 43. Gun Z, Zhang x, Balta-Ozkan N, Luk P. Aviation to Grid: Airport Charging Infrastructure for Electric Aircraft. *International Conference on Applied Energy*. 2020. Preuzeto s: [Proceedings of \(brunel.ac.uk\)](#) [Pristupljeno: 25. travnja 2024.]

44. EATON. *Setting the standard of cutting-edge electric aircraft charging*. Preuzeto s: [eaton-green-motion-air-brochure-for-paris-air-show-en-us.pdf](https://www.eaton.com/content/dam/eaton/marketing/brochures/eaton-green-motion-air-brochure-for-paris-air-show-en-us.pdf) [Pristupljeno: 25. travnja 2024.]
45. Adu-Gyamfi B.A, Good C. Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies. *Transportation Engineering*. 2022;100134. Preuzeto s: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100134> [Pristupljeno: 24. travnja 2024.]
46. tportal. *Uspješno poletio prvi potpuno električni putnički avion, evo što sve znamo o Alice, za koju su zainteresirani i neki globalni poslovni divovi*. Preuzeto s: https://www.tportal.hr/vijesti/clanak/uspjesno-poletio-prvi-potpuno-elektricni-putnicki-avion-evo-sto-sve-znamo-o-alice-za-koju-su-zainteresirani-i-neki-globalni-poslovni-divovi-foto-20220928?meta_refresh=1 [Pristupljeno: 19. travnja 2024.]
47. MIT Technology Review. *This is what's keeping electric planes from taking off*. Preuzeto s: <https://www.technologyreview.com/2022/08/17/1058013/electric-planes-taking-off-challenges/> [Pristupljeno: 19. travnja 2024.]
48. Toptal Finance. *Green for Takeoff: Inside the Electric Airplane Industry*. Preuzeto s: <https://www.toptal.com/finance/market-research-analysts/electric-airplanes> [Pristupljeno: 26. travnja 2024.]
49. NASA Spinoff. *Battery Innovations Power All-Electric Aircraft*. Preuzeto s: [Battery Innovations Power All-Electric Aircraft | NASA Spinoff](https://www.nasa.gov/spinoff/battery-innovations-power-all-electric-aircraft/) [Pristupljeno 27. travnja 2024.]
50. IATA. *Net zero 2050: sustainable aviation fuels*. Preuzeto s: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---alternative-fuels/#:~:text=The%20aviation%20industry's%20net%2Dzero,improvements%20to%20air%20traffic%20navigation>) [Pristupljeno: 14. travnja 2024.]
51. Airbus. *Hydrogen in aviation: how close is it?*. Preuzeto s: [Hydrogen in aviation: how close is it? | Airbus](https://www.airbus.com/en/innovation/airbus-hydrogen-aviation) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
52. Airbus. *ZEROe Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft*. Preuzeto s: [ZEROe - Low carbon aviation - Airbus](https://www.airbus.com/en/innovation/zeroe) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
53. AOPA. *Hydrogen-Powered Piper Circuits Pattern*, Preuzeto s: [Hydrogen-powered Piper circuits pattern - AOPA](https://www.aopa.org/news-and-media/current/hydrogen-powered-piper-circuits-pattern) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
54. Air Liquide. *Air Liquide, Airbus and Groupe ADP partner to prepare Paris airports for the hydrogen era*. Preuzeto s: [Air Liquide, Airbus and Groupe ADP partner to prepare Paris airports for the hydrogen era | Air Liquide](https://www.airliquide.com/en/press-releases/air-liquide-airbus-and-groupe-adp-partner-to-prepare-paris-airports-for-the-hydrogen-era) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
55. Airbus. *Airbus, Air Liquide and VINCI Airports announce a partnership to promote the use of hydrogen and accelerate the decarbonization of the aviation sector*. Preuzeto s: [Airbus, Air Liquide and VINCI Airports announce a partnership to promote the use of hydrogen and accelerate the decarbonization of the aviation sector | Airbus](https://www.airbus.com/en/innovation/airbus-air-liquide-and-vinci-airports-announce-a-partnership-to-promote-the-use-of-hydrogen-and-accelerate-the-decarbonization-of-the-aviation-sector) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
56. De Havilland Aircraft of Canada Limited. *New Release*. Preuzeto s: [News Release | De Havilland](https://www.dehavilland.com/news-releases) [Pristupljeno 27. travnja 2024.]

57. Airbus. *Airbus and Linde to cooperate on hydrogen infrastructure for airports*. Preuzeto s: [Airbus and Linde to cooperate on hydrogen infrastructure for airports | Airbus](#) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
58. Airbus. *Airbus and Kansai Airports partner to study the use of hydrogen in the decarbonisation of the aviation sector in Japan*. Preuzeto s: [Airbus and Kansai Airports partner to study the use of hydrogen in the decarbonisation of the aviation sector in Japan | Airbus](#) [Pristupljeno 27. travnja 2024.]
59. EMEC. *HyFlyer II first flight test of hydrogen-electric engine*. Preuzeto s: [HyFlyer II first flight test of hydrogen-electric engine : EMEC: European Marine Energy Centre](#) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
60. Ain. *Universal Hydrogen Flies Hydrogen-Powered Dash 8*. Preuzeto s: [Universal Hydrogen Flies Hydrogen-Powered Dash 8 \(ainonline.com\)](#) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
61. ICAO. *Battery technology, fueling Aviation Electrification*. Preuzeto s: <https://www.icao.int/Meetings/Stocktaking2021/Pages/prest1.aspx> [Pristupljeno: 24. travnja 2024.]
62. Battery Technology. *Will Electric Flight Succeed?*. Preuzeto s: [Will Electric Flight Succeed? \(batterytechonline.com\)](#) [Pristupljeno: 26. travnja 2024.]
63. PIPISTREL. *Electric Pioneer, VElis Electro*. Preuzeto s: [Velis Electro - Pipistrel \(pipistrel-aircraft.com\)](#) [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
64. Robb Report. *Eviation's Hotly Anticipated Electric Commuter Plane Will Make Its Maiden Voyage This Year*. Preuzeto s: [Eviation's Alice Electric Plane Could Be Ready for Operation in 2024 \(robbreport.com\)](#) [Pristupljeno 28. travnja 2024.]
65. Skies. *Orders for Eviation Alice all-electric aircraft now valuated at over US\$4 billion*. Preuzeto s: <https://skiesmag.com/news/orders-eviation-alice-all-electric-aircraft-valued-over-4-billion/> [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]
66. ISKIES. *Harbour Air Bolsters plan to electrify its aircraft fleet with magniX LOI for 50 electric engines*. Preuzeto s: <https://skiesmag.com/news/harbour-air-bolsters-plan-electrify-aircraft-fleet-magnix-loi-50-electric-engines/> [Pristupljeno: 28. travnja 2024.]
67. Wright. *All short flights will be zero-emissions*. Preuzeto s: <https://www.weflywright.com/aircraft> [Pristupljeno 28. travnja 2024.]
68. ICAO. *Renewable Energy for Aviation: Practical Applications to Achieve Carbon Reductions and Cost Savings*. Preuzeto s: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO_UNDP_GEF_RenewableEnergyGuidance.pdf [Pristupljeno: 27. travnja 2024.]

POPIS KRATICA

CO ₂	Ugljikov (IV) oksid
NO _x	Dušikovi oksidi
EASA	Agencija Europske unije za sigurnost zračnog prometa (European Union Aviation Safety Agency)
EU	Europska Unija
EFTA	Zemlje Europskog udruženja za slobodnu trgovinu (European Free Trade Association)
ICAO	Organizacija međunarodnog civilnog zrakoplovstva (International Civil Aviation Organisation)
NNC	engl. Non Noise Certificated
USS	Uzletno-sletna staza
Lden	Indikator buke za dan-večer-noć
Lnight	Indikator noćne buke
IATA	Međunarodno udruženje za zračni promet (The International Air Transport Association)
MSW	Čvrsti komunalni otpad (Municipal Solid Waste)
CDD	Građevinski otpad i otpad od rušenja (Construction and Demolition Debris)
ACI	Međunarodno vijeće zračnih luka (Airport Council International)
UNEP	Program Ujedinjenih naroda za okoliš (United Nations Environment Programme)
SO ₂	Sumporov (IV) oksid
HC	Ugljikovodici
CO	Ugljik (II) oksid
ERF	Procijenjeni efektivni utjecaj zračenja (Effective Radiative Forcing)
nvPM	Nehlapljive čestice (non-volatile particulate matter)
EAER	Izvješće o okolišu u europskom zračnom prometu (European Aviation Environmental Report)

EPNdB	engl. Effective perceived noise in decibels
SAF	Održiva zrakoplovna goriva (Sustainable Aviation Fuel)
HEFA	Hidroprocesni esteri i masne kiseline (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)
PtL	Engl. Power-to-Liquid
CORSIA	Engl. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
ATM	Upravljanje zračnim prometom (Air Traffic Management)
ANP	Engl. Aircraft Noise and Performance data
ETS	Engl. The EU Emission Trading System
CAEP	Odbor za zaštitu okoliša u zračnom prometu (Committee on Aviation Environmental Protection)
PM	Čestice (Particulate Matter)
DNL	Engl. Day-Night Level
RTK	Prihod od tonskih kilometara (Revenue Tonne Kilometers)
ASTM	Američko udruženje za testiranje i materijale (American Society for Testings and Materials)
GHG	Staklenički plinovi (Greenhouse Gas)
SARPs	Standardi i preporučene prakse (Standards and Recommended Practices)
R&D	Razvoj i istraživanje (Research and Development)
H2	Vodik (Hydrogen)
OIE	Obnovljivi izvori energije
SMR	Parna reforma metana (Steam Methane Reforming)
Ni-Cd	Nikal kadmij
Li-ion	Litij-ion
ALP	Plan rasporeda zračne luke (Airport Layout Plan)
A2G	Engl. Aviation to Grid
LTAG	Dugoročni aspiracijski cilj (Long Term Aspirational Goal)

BWB	Engl. Blended-Wing Body
MoU	Memorandum o razumijevanju (Memorandum of Understanding)
VFR	Vizualan režim leta (Visual Flight Rules)

POPIS SLIKA

Slika 1. Točke mjerenja buke.....	5
Slika 2. Primjer hijerarhije upravljanja otpadom prema Programu Ujedinjenih naroda za okoliš	7
Slika 3. Prikaz učinka CO ₂ po putniku naspram učinka od emisija koje nisu CO ₂	8
Slika 4. Prikaz zračnih luka koje pružaju SAF (zeleno: kontinuirane isporuke; narančasto: isporuke u serijama)	12
Slika 5. SAF koncept proizvodnih puteva	16
Slika 6. SAF proizvodni putevi – procesi pretvorbe.....	17
Slika 7. Scenarij 1, vodik proizveden i ukapljen van zračne luke, transportirani cisternama .	19
Slika 8. Scenarij 2, vodik proizveden van zračne luke, isporučen plinovodom i ukapljen u zračnoj luci	19
Slika 9. Scenarij 3, vodik proizveden i ukapljen lokalno u zračnoj luci.....	20
Slika 10. Prikaz prostornog zahtjeva za tri infrastrukturna scenarija	20
Slika 11. Hibridni zrakoplov Zunum Aero ZA10	22
Slika 12. Dvije strategije punjena baterije	24
Slika 13. Prvi punjač baterija za zrakoplove (fiksni i mobilni)	25
Slika 14. Usporedba učinkovitosti između pogonskih goriva električnog i konvencionalnog zrakoplova	29
Slika 15. Baterija za NASA-in zrakoplov X-57 Maxwell	30
Slika 16. Airbus ZEROe Blended-Wing Body zrakoplov	33
Slika 17. Zrakoplov Eviation Alice.....	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Odobreni procesi pretvorbe SAF-a	13
Tablica 2. Procesi pretvorbe SAF-a u evaluaciji	14
Tablica 3. Usporedba karakteristika mlaznog goriva i kriogenog vodika	27
Tablica 4. Usporedba kerozina i vodika u okruženju zračne luke	28

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 mojega 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 „PRIMJENA ALTERNATIVNIH IZVORA ENERGIJE U FUNKCIJI ODRŽIVOG RAZVOJA ZRAČNOG PROMETA“, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student: Krešimir Markovinović

U Zagrebu, 29. travnja 2024.



(ime i prezime, potpis)