

# Planiranje i projektiranje lučke infrastrukture za prihvat brodova na vodik

---

**Altarac, Srđan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:684382>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**SRĐAN ALTARAC**

**PLANIRANJE I PROJEKTIRANJE LUČKE  
INFRASTRUKTURE ZA PRIHVAT BRODOVA NA VODIK**

**ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**PLANIRANJE I PROJEKTIRANJE LUČKE  
INFRASTRUKTURE ZA PRIHVAT BRODOVA NA VODIK  
PLANNING AND DESIGN OF THE PORT  
INFRASTRUCTURE FOR THE RECEPTION OF HYDROGEN  
- POWERED SHIPS**

**ZAVRŠNI RAD  
BACHELOR THESIS**

Kolegij: Tehnologija luka i terminala

Mentor: izv. prof. dr. sc. Livia Maglić

Student/studentica: Srđan Altarac

Studijski smjer: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112001572

Rijeka, srpanj 2024.

Student: Srđan Altarac

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112001572

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom

*Planiranje i projektiranje lučke infrastrukture za prihvat brodova na vodik*

---

izradio/la samostalno pod mentorstvom

*izv.prof. doc dr. sc Livije Maglić*

---

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezao/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student/studentica



---

(potpis)

Student: Srđan Altarac

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112001572

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student/studentica - autor



---

(potpis)

## SAŽETAK

Planiranje i projektiranje lučke infrastrukture za prihvat brodova na vodik predstavlja ključni korak prema ostvarenju održivijeg i ekonomski isplativijeg pomorskog sektora. U ovom radu istražuje se složenost ovog procesa koji uključuje analizu utjecaja na okoliš, implementaciju mjera za smanjenje ekološkog otiska, promociju održivih praksi i tehnologija te provedbu studija slučaja poput Holland Hydrogen 1. Kroz provedbu studija slučaja Holland Hydrogen 1, analizirani su rezultati i zaključci koji pokazuju kako integrirani pristup može doprinijeti smanjenju emisija stakleničkih plinova i poboljšanju ekonomske isplativosti. Nalazi istraživanja ukazuju na to da efikasno planiranje i projektiranje lučke infrastrukture za brodove na vodik može potaknuti održivost i ekonomsku isplativost korištenja vodika kao pogonskog goriva u pomorskom sektoru. Konkretno, implementacija novih tehnologija i održivih praksi može značajno smanjiti ekološki otisak i pridonijeti globalnim ciljevima zaštite okoliša i održivog razvoja. Zaključno, ovaj rad naglašava važnost sveobuhvatnog pristupa koji uključuje tehničke, ekonomske, ekološke i društvene aspekte kako bi se osigurala učinkovita i održiva lučka infrastruktura za prihvat brodova na vodik. Efikasno planiranje i projektiranje ne samo da omogućuje optimizaciju procesa proizvodnje, distribucije i korištenja vodika, već i promovira rast i razvoj u pomorskom sektoru, doprinoseći tako globalnim naporima za zaštitu okoliša i održiv razvoj.

Ključne riječi: *lučka infrastruktura, brodovi na vodik, planiranje, projektiranje.*

## SUMMARY

Planning and designing port infrastructure for the reception of hydrogen-powered ships represents a key step towards realising a more sustainable and economically profitable maritime sector. This paper explores the complexity of this process, which includes environmental impact analysis, the implementation of measures to reduce the ecological footprint, the promotion of sustainable practices and technologies, and the implementation of case studies such as Holland Hydrogen 1. Through the implementation of Holland Hydrogen 1 case studies, the results and conclusions show how an integrated approach can contribute to reducing greenhouse gas emissions and improving economic profitability. Research findings indicate that efficient planning and designing of port infrastructure for hydrogen-powered

ships can promote the sustainability and financial profitability of using hydrogen as a propellant in the maritime sector. In particular, the implementation of new technologies and sustainable practices can significantly reduce the ecological footprint and contribute to the global goals of environmental protection and sustainable development. In conclusion, this paper highlights the importance of a comprehensive approach that includes technical, economic, environmental and social aspects to ensure an efficient and sustainable port infrastructure to accommodate hydrogen ships. Efficient planning and design not only enables the optimization of hydrogen production, distribution and use processes but also promotes growth and development in the maritime sector, thus contributing to global efforts for environmental protection and sustainable development.

*Keywords: Port infrastructure, hydrogen powered ships, planning, design, Holland Hydrogen 1.*

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK.....</b>	<b>I</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>I</b>
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA.....	1
1.2. RADNA HIPOTEZA .....	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA .....	2
1.4. ZNANSTVENE METODE .....	2
1.5. STRUKTURA RADA.....	2
<b>2. TEHNOLOŠKE I OPERATIVNE ZNAČAJKE BRODOVA NA VODIK.....</b>	<b>3</b>
2.1. POVIJEST KORIŠTENJA VODIKA KAO POGONSKOG GORIVA .....	3
2.2. VODIK KAO POGONSKO GORIVO – PREDNOSTI I NEDOSTACI .....	5
2.3. IZAZOVI U IMPLEMENTACIJI VODIKA KAO POGONSKOG GORIVA: SKLADIŠTENJE I PRIJEVOZ.....	8
2.4. TEHNOLOŠKI RAZVOJ BRODOVA NA VODIK .....	9
2.5. PREDNOSTI I IZAZOVI BRODOVA NA VODIK .....	14
<b>3. LUČKA INFRASTRUKTURE ZA PRIHVAT BRODOVA NA VODIK .....</b>	<b>16</b>
3.1. TERMINALI ZA UKRCAJ I ISKRCAJ: DOKOVI I PRIVEZNE POSTAJE, PUMPE I CJEVOVODI.....	16
3.2. SKLADIŠTENJE VODIKA – SPREMNICI ZA VODIK, HLAĐENJE I KOMPRESIJA.....	19
3.3. BUNKERING – POSTAJE ZA PUNJENJE GORIVA, SIGURNOSNA OPREMA – DETEKTORI CURENJA, VATROGASNA OPREMA.....	22
3.4. LOGISTIČKI I OPERATIVNI CENTRI- CENTRI ZA NADZOR I UPRAVLJANJE OPERACIJAMA .....	24
3.5. SIGURNOSNI STANDARDI I PROPISI.....	26
<b>4. PROJEKTIRANJA I PLANIRANJA LUČKE INFRASTRUKTURE ZA BRODOVE NA VODIK.....</b>	<b>27</b>
4.1. GEOGRAFSKA ANALIZA LOKACIJA ZA PRIHVATNI TERMINAL .....	28
4.2. PROJEKTIRANJE OPERATIVNIH POSTROJENJA.....	29
4.3. PLANIRANJE ENERGETSKIH SUSTAVA ZA PROIZVODNJU, SKLADIŠTENJE I DISTRIBUCIJU VODIKA.....	30



<b>5. STUDIJA SLUČAJA: PROJEKTIRANJE PRIHVATNOG TERMINALA ZA BRODOVE NA VODIK NA PRIMJERU ROTTERDAMU HYDROGEN HOLLAND 1</b>	<b>33</b>
5.1. OPIS PODRUČJA .....	33
5.2. ANALIZA ZAHTJEVA I SPECIFIKACIJA .....	35
5.3. PLANIRANJE I PROJEKTIRANJE LUČKE INFRASTRUKTURE .....	36
5.4. FINANCIJSKA PROCJENA I EKONOMSKA OPRAVDANOST.....	37
<b>6. EKOLOŠKI ASPEKTI I ODRŽIVOST LUČKE INFRASTRUKTURE ZA BRODOVE NA VODIK .....</b>	<b>39</b>
6.1. PROCJENA UTJECAJA LUČKE INFRASTRUKTURE NA OKOLIŠ, UKLJUČUJUĆI EMISIJE I UPRAVLJANJE OTPADOM .....	39
6.2. IMPLEMENTACIJA MJERA ZA SMANJENJE EKOLOŠKOG OTISKA TERMINALA ZA BRODOVE NA VODIK .....	41
6.3. PROMOCIJA ODRŽIVIH PRAKSI I TEHNOLOGIJA U RAZVOJU LUČKE INFRASTRUKTURE.....	42
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>45</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>47</b>
<b>KAZALO KRATICA .....</b>	<b>52</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>54</b>

# 1. UVOD

U današnjem svijetu koji se suočava s izazovima klimatskih promjena i potrebom za održivijim energetske rješenjima, postaje sve važnije tražiti ekološki prihvatljive alternative za pogon plovila. U tom kontekstu, upotreba vodika kao pogonskog goriva postaje sve privlačnija opcija. Vodik, kao čisti energent, obećava značajno smanjenje emisija stakleničkih plinova i drugih onečišćujućih tvari, što ga čini ključnim igračem u ostvarivanju čiste i održive budućnosti pomorskog transporta.

Rastuća svijest o važnosti očuvanja okoliša i potreba za hitnim djelovanjem kako bi se zaustavile klimatske promjene potiču istraživanje i razvoj novih tehnologija. Brodovi na vodik, s svojom sposobnošću da koriste čisti vodik kao gorivo bez emisija CO<sub>2</sub> i drugih štetnih tvari, postaju ključna komponenta u transformaciji pomorskog sektora prema održivijem i ekološki prihvatljivijem modelu.

## 1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Uvođenje vodika kao pogonskog goriva za brodove donosi sa sobom niz tehničkih, infrastrukturnih i ekoloških izazova. Ključni problem s kojim se suočava jest prilagodba lučke infrastrukture kako bi se omogućio prihvat, pohrana i distribucija vodika za ove brodove. Stoga je lučka infrastruktura za prihvat brodova na vodik predmetom ovog istraživanja, dok su objekti istraživanja usmjereni na prikaz različitih aspekata, te infrastrukture luka za prihvat brodova na vodik kroz primjer Rotterdam Hydrogen Holland 1.

## 1.2. RADNA HIPOTEZA

Na temelju postavljenog problema, predmeta i objekta istraživanja postavlja se radna hipoteza koja glasi: *Prilagodba lučke infrastrukture za vodik omogućava siguran i učinkovit prihvat brodova na vodikov pogon, što je vidljivo kroz primjer Rotterdam Hydrogen Holland 1.*

### **1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

Svrha istraživanja je dublje razumijevanje mogućnosti i izazova u planiranju i projektiranju lučke infrastrukture za prihvat brodova na vodik. Postavljeni ciljevi istraživanja uključuju detaljnu analizu tehničkih karakteristika brodova na vodik, istraživanje elemenata lučke infrastrukture, razmatranje projektiranja i planiranja infrastrukture te procjenu ekološkog utjecaja i identifikaciju mjera za smanjenje negativnih posljedica.

### **1.4. ZNANSTVENE METODE**

Za postizanje svrhe i ciljeva istraživanja korišten je niz znanstvenih metoda. Korištene metode su: metoda deskripcije, analize te studija slučaja.

### **1.5. STRUKTURA RADA**

Rad je podijeljen na sedam poglavlja. Prvo poglavlje je uvodno, u njemu se definira tema istraživanja - prilagodba lučke infrastrukture za prihvat brodova na vodik. Postavljaju se ciljevi istraživanja te se opisuje metodologija koja će biti korištena. U drugom poglavlju detaljno se istražuju tehnološke i operativne karakteristike brodova koji koriste vodik kao pogonsko gorivo. Pruža se dublji uvid u prednosti i nedostatke korištenja vodika kao pogonskog goriva te kako se to odražava na tehničke specifikacije i operativne zahtjeve brodova. U trećem poglavlju proučavaju se elementi lučke infrastrukture za prihvat brodova na vodik, uključujući punionice, sustave za skladištenje, električnu infrastrukturu te sigurnosne standarde i propise. Opisuje se proces planiranja i projektiranja lučke infrastrukture za prihvat brodova na vodik, uključujući geografsku analizu lokacija, projektiranje operativnih postrojenja te planiranje energetske sustava. U četvrtom poglavlju analizira se primjer Rotterdam Hydrogen Holland 1 kao studija slučaja, uključujući opis područja, analizu zahtjeva i specifikacija, planiranje i projektiranje lučke infrastrukture te financijska procjena i ekonomska opravdanost. U petom poglavlju raspravlja se o utjecaju lučke infrastrukture na okoliš, implementaciji mjera za smanjenje ekološkog otiska te promociji održivih praksi i tehnologija. U završnom poglavlju sažimaju se glavni nalazi istraživanja i daju preporuke za daljnje istraživanje ili implementaciju.

## **2. TEHNOLOŠKE I OPERATIVNE ZNAČAJKE BRODOVA NA VODIK**

U ovom poglavlju istražuju se tehničke i operativne značajke brodova koji koriste vodik kao pogonsko gorivo. Vodik kao čisti energent, nudi niz prednosti u odnosu na tradicionalna fosilna goriva. Prvenstveno, vodikov pogonski sustav omogućuje plovilima da ostvare visoke performanse uz minimalne ili nikakve emisije štetnih plinova. Ova činjenica čini brodove na vodik ključnim akterima u borbi protiv klimatskih promjena te pridonosi smanjenju globalnih emisija stakleničkih plinova [1].

Unatoč brojnim prednostima, upotreba vodika kao pogonskog goriva nosi i određene izazove koji zahtijevaju napredna tehnološka rješenja. Jedan od najvažnijih izazova je efikasno i sigurno skladištenje vodika na brodu. Vodik se skladišti pod visokim pritiskom ili u tekućem stanju pri niskim temperaturama, što zahtijeva inovativne tehnike i materijale kako bi se osigurala sigurnost i stabilnost [1]. Osim toga, razvoj gorioničkih sustava koji mogu učinkovito pretvoriti vodik u energiju uz minimalne gubitke također predstavlja izazov. Napredne tehnologije u području gorioničkih sustava ključne su za postizanje visokih performansi brodova na vodik uz istovremeno smanjenje potrošnje i emisija.

Uz napredak tehnologije, operativne karakteristike brodova na vodik također se poboljšavaju. To uključuje produženje vremena plovidbe između punjenja, smanjenje potrebe za održavanjem te poboljšanu otpornost na ekstremne uvjete plovidbe. U cjelini, brodovi na vodik predstavljaju inovativno rješenje za održivi pomorski transport. Njihove tehničke i operativne karakteristike odražavaju potencijal za značajno smanjenje emisija i doprinos globalnim naporima zaštite okoliša. Međutim, daljnji razvoj tehnologije i infrastrukture ključan je za širenje upotrebe brodova na vodik i ostvarivanje punog potencijala ovog održivog energenta u pomorskom sektoru [2].

### **2.1. POVIJEST KORIŠTENJA VODIKA KAO POGONSKOG GORIVA**

Povijest korištenja vodika kao pogonskog goriva seže daleko unatrag, sve do 16. stoljeća kada je po prvi put detaljno opisana njegova reaktivnost. Međutim, upotreba vodika kao goriva za transportne svrhe počela se značajnije razvijati tek tijekom 19. i 20. stoljeća [2].

Početakom 19. stoljeća, vodik je prvi put korišten kao pogonsko gorivo za eksperimentalne letjelice. Francuski znanstvenik Jacques Charles konstruirao je 1783. godine leteći balon napunjen vodikom, koji je zbog svoje male mase i visoke podizne sile omogućio prve uspješne letove ljudi u zraku[2]. Nacionalna aeronautička i svemirska administracija, engl. *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) je bila jedna od vodećih organizacija koja je u 1950-ima i 1960-ima istraživala upotrebu vodika kao goriva za rakete i svemirske letjelice [2].

Vodik je privukao pažnju znanstvenika i inženjera zbog svoje visoke energetske gustoće i čistoće izgaranja. Gorivne ćelije koje koriste vodik kao gorivo imaju potencijal da proizvedu električnu energiju bez emisije štetnih plinova, čime su postale izuzetno atraktivne u kontekstu razvoja održivih i ekološki prihvatljivih pogonskih sustava [3].

NASA je koristila vodik kao gorivo za rakete i svemirske letjelice jer je vodikov oksidacijski potencijal omogućavao visoku efikasnost i snagu potrebnu za lansiranje letjelica u svemir. Osim toga, činjenica da se kao nusprodukt izgaranja stvara samo čista voda činila je vodikovu gorivnu ćeliju idealnom za upotrebu u okolišu osjetljivim prostorima kao što je svemir.

NASA-ina istraživačka napori bili su koncentrirani na povećanje učinkovitosti i pouzdanosti gorivnih ćelija, što je u konačnici dovelo do njihove široke primjene. Napredak postignut u poboljšanju učinkovitosti, dugovječnosti i pouzdanosti, zajedno sa smanjenjem troškova proizvodnje i održavanja, učinio je gorivne ćelije ekonomski isplativim za komercijalnu upotrebu [3].

S napretkom tehnologije, gorivne ćelije počele su dobivati primjenu u kopnenim vozilima. Vozila s vodikovim pogonom koriste gorive ćelije za proizvodnju električne energije koja pokreće električne motore. Ovaj razvoj nudi brojne prednosti, kao što je ekološki prihvatljiv, tih rad i kraće vrijeme punjenja goriva za spremnik vodika u usporedbi s punjenjem baterija u električnim vozilima [3].

Početakom 1990-ih automobili na vodik debitirali su s automobilskim divovima poput Toyote, Honde i Daimlera koji su predstavili svoje prve prototipove [3]. Ova vozila prošla su rigorozna testiranja i usavršavanja kako bi bila spremna za tržište. Istovremeno su uloženi napori da se uspostavi sveobuhvatna infrastruktura za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vodika, uključujući uvođenje stanica za punjenje vodikom. Do kraja desetljeća ograničena proizvodnja automobila na vodik postala je stvarnost zahvaljujući ovim naprecima.

Prvi pokušaji korištenja vodikovih gorivnih ćelija u pomorskom sektoru započeli su tijekom kasnijih desetljeća 20. stoljeća. Rani eksperimenti su se uglavnom fokusirali na manje brodove i plovila te su imali ograničeni opseg i učinkovitost. S tehnološkim napretkom i rastućim interesom za održive alternative tradicionalnim gorivima, istraživanje i razvoj vodikovih gorivnih ćelija za pomorsku primjenu postali su sve intenzivniji [3].

Danas, vodikove gorivne ćelije predstavljaju jednu od najperspektivnijih tehnologija za pogon brodova, nudeći ekološki prihvatljivu alternativu fosilnim gorivima. Razvoj infrastrukture za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vodika i dalje je u tijeku kako bi se podržala masovna implementacija brodova na vodik i promicala održiva budućnost pomorskog prometa. Također, vodik je ključni element u svjetskim naporima za promicanje održivosti i smanjenje emisija ugljika. Sa svojim statusom najrasprostranjenijeg elementa u svemiru, vodik ima potencijal uvelike smanjiti emisije stakleničkih plinova kada se koristi kao čisti izvor energije. Mnoge zemlje i međunarodne organizacije ulažu u istraživanje i unapređenje vodikovih tehnologija, priznajući njegovu ključnu ulogu u pomaku prema gospodarstvu s niskom razinom ugljika. Korištenje vodika može pomoći u postizanju ciljeva navedenih u Pariškom sporazumu, ublažavanju globalnog zatopljenja i poticanju inovacija unutar energetske industrije. Međunarodna agencija za energiju (IEA) naglašava važnost vodika u dekarbonizaciji industrijskih i transportnih sektora, predviđajući značajan porast globalne potražnje za vodikom kako tehnologija napreduje i infrastruktura se širi[4].

## **2.2. VODIK KAO POGONSKO GORIVO – PREDNOSTI I NEDOSTACI**

Korištenje vodika kao pogonskog goriva sve više dobiva na važnosti u kontekstu tranzicije prema čistim i održivijim izvorima energije. Vodik se često ističe kao ključni nositelj energije u svijetu alternativnih i obnovljivih izvora energije, s potencijalom da smanji ovisnost o fosilnim gorivima i doprinese smanjenju emisija stakleničkih plinova. Međutim, iako vodik nudi niz prednosti kao izvor energije, isto tako nosi i određene nedostatke i izazove koji sprječavaju njegovu širu upotrebu [4].

Prednosti korištenja vodika kao pogonskog goriva su [4]:

### **- Ekološka prihvatljivost i smanjenje emisije stakleničkih plinova**

Vodik se smatra ekološki prihvatljivim gorivom jer njegovo izgaranje ne proizvodi CO<sub>2</sub> ili druge štetne plinove koji pridonose globalnom zatopljenju i onečišćenju zraka. Kao rezultat, korištenje vodika kao izvora energije doprinosi smanjenju negativnog utjecaja na okoliš i pomaže u borbi protiv klimatskih promjena.

### **- Obnovljivost i izobilje**

Vodik je obnovljiv resurs koji se može proizvesti iz različitih izvora, uključujući obnovljive izvore energije poput solarne i vjetroenergije. Budući da se vodik može proizvesti iz vode putem elektrolize, a voda je obilno raspoloživ resurs na Zemlji, nema rizika od iscrpljivanja ili nestanka vodika kao goriva.

### **- Čistoća i nusprodukti**

Sagorijevanjem vodika ne ostaju nikakve nečistoće, već se proizvodi samo čista voda (H<sub>2</sub>O) kao nusprodukt. Ova činjenica čini vodik izuzetno čistim gorivom, što je važno za očuvanje čistoće zraka i okoliša.

### **- Netoksičnost**

Vodik je netoksičan element, što ga čini sigurnijim za rukovanje i korištenje u usporedbi s mnogim drugim gorivima, poput benzina ili dizela. Ova svojstva čine vodik atraktivnim za upotrebu u različitim sektorima, uključujući transport i industriju.

### **- Visoka energetska vrijednost**

Vodik ima visoku energetsku gustoću, što znači da sadrži veliku količinu energije po jedinici mase. To čini vodik učinkovitim izvorom energije za različite primjene, uključujući transportna sredstva i proizvodne procese.

### **- Opća učinkovitost**

Vozila koja koriste vodik kao gorivo obično imaju veći doseg od vozila koja koriste istu količinu konvencionalnih goriva poput benzina ili dizela. To znači da vozila s vodikom mogu svladati veće udaljenosti s manje goriva, što može rezultirati uštedama i manjom potrošnjom goriva.

S druge strane, nedostaci korištenja vodika kao pogonskog goriva su [4]:

**- Visoki troškovi proizvodnje:**

Trenutačno je cijena proizvodnje čistog vodika visoka i općenito se smatra da nije ekonomski isplativa u usporedbi s konvencionalnim gorivima. Ova visoka cijena proizvodnje djeluje kao prepreka širokom prihvaćanju vodika kao izvora goriva.

**- Nedovoljna infrastruktura:**

Trenutna globalna dostupnost stanica za gorivo vodikom izuzetno je ograničena, što predstavlja značajnu prepreku širokoj upotrebi vodika u transportnoj industriji. Nedostatak infrastrukture za punjenje vodikom ograničava dostupnost ovog goriva za potrošače.

**- Problemi s prijevozom:**

Prijevoz vodika može biti nezgodan zbog visoke zapaljivosti i potrebe za specijaliziranim spremnicima i infrastrukturom. Ovi izazovi čine transport vodika složenim i skupim procesom.

**- Metode skladištenja:**

Metode skladištenja vodika, poput stlačenog plina ili tekućeg vodika, nisu jednostavne i često zahtijevaju posebne spremnike i tehnologije. Nedostatak jednostavnih i učinkovitih metoda skladištenja dodatno komplicira širu upotrebu vodika kao goriva.

**- Sigurnosni problemi:**

Vodik je vrlo zapaljiv element, pa postoji rizik od incidenata ili eksplozija prilikom rukovanja ili korištenja vodika kao goriva. Potrebno je uložiti napore u razvoj sigurnosnih mjera i tehnologija koje će minimizirati ove rizike i osigurati sigurnu upotrebu vodika.

**- Curenje i otkrivanje:**

Vodikova vrlo mala molekularna veličina može rezultirati obilnim curenjem kroz rezervoare i cjevovode. Također, vodik nema miris poput prirodnog plina, pa se moraju koristiti posebni senzori za otkrivanje curenja, što dodatno komplicira njegovu upotrebu.



## **2.3. IZAZOVI U IMPLEMENTACIJI VODIKA KAO POGONSKOG GORIVA: SKLADIŠTENJE I PRIJEVOZ**

Primjena vodika kao goriva predstavlja ključni segment u tranziciji prema održivijem i ekološki prihvatljivijem prometu. Vodik se smatra ekološki prihvatljivim gorivom zbog njegovog čistog izgaranja koje ne proizvodi CO<sub>2</sub> i ne doprinosi globalnom zatopljenju, pogotovo kada se proizvodi iz obnovljivih izvora energije. Potencijal primjene vodika kao goriva proteže se na sve segmente prometa, uključujući cestovni, pomorski, zračni i željeznički promet, pa čak i u ultra laganim gorivnim ćelijama koje se koriste u dronovima. [5,6].

Vodikova ekonomija predstavlja sustav u kojem se vodik koristi kao glavni nositelj energije s ciljem zamjene fosilnih goriva i smanjenja emisija stakleničkih plinova. Ključni elementi vodikove ekonomije uključuju proizvodnju, skladištenje, prijevoz i primjenu vodika. Iako postoji rastuća potpora za ovakav energetske sustav, postoje izazovi koji uključuju troškove i učinkovitost proizvodnje vodika te razvoj infrastrukture za njegovo skladištenje, transport i distribuciju [5].

Različiti postupci proizvodnje vodika uključuju elektrolizu, reformiranje fosilnih goriva i goriva iz biomase, krekiranje ugljikovodika te reakciju željeza u vodi. Elektroliza se smatra jednim od najperspektivnijih načina proizvodnje vodika, pogotovo kada se koristi s obnovljivim izvorima energije. Cilj je smanjiti cijenu vodika na tržištu, što se postiže razvojem tehnologije i potporom vlada, industrije i istraživača diljem svijeta [6].

Uspjeh u implementaciji vodika kao goriva ovisi o razvoju ekonomičnih i održivih metoda proizvodnje vodika te izgradnji infrastrukture koja podržava njegovu upotrebu. Zeleni vodik proizveden iz obnovljivih izvora energije elektrolizom predstavlja perspektivan smjer razvoja u postizanju čistije i održivije energetske budućnosti [7].

Nadalje, skladištenje i prijevoz vodika su ključni aspekti u širenju upotrebe vodika kao pogonskog goriva. Postojeći izazovi u ovim područjima uvelike utječu na širu implementaciju vodika kao alternativnog goriva u različitim sektorima prometa [7].

Skladištenje vodika predstavlja tehnički složen proces s obzirom na izuzetno nisku volumetrijsku gustoću vodika. Postoje tri glavna načina skladištenja: stlačeni plin, ukapljeni vodik i kemijsko skladištenje. Stlačeni plin je najčešća metoda, ali zahtijeva teške spremnike

pod visokim tlakom, što može biti financijski neisplativo i predstavljati izazove u sigurnosti. Korištenjem kompozitnih materijala i polimernih omotača može se postići veća gustoća energije, ali se moraju rješavati problemi sigurnosti i materijala [8,9].

Ukapljeni vodik se skladišti kao tekućina pri vrlo niskim temperaturama, što zahtijeva energetske intenzivne procese ukapljivanja. Iako ima veću gustoću energije od stlačenog plina, zahtijeva posebnu infrastrukturu i česte kontrole zbog mogućnosti isparavanja i povećanja tlaka u spremniku. Kemijsko skladištenje uključuje veze vodika s drugim tvarima poput amonijaka ili metalnih hidrida, što može pružiti veću gustoću energije i sigurnost, ali se suočava s izazovima u kinetici otpuštanja vodika i procesima regeneracije [8].

Prijevoz vodika također predstavlja izazov zbog cijene i sigurnosti. Koriste se različite metode kao što su cjevovodi, tankeri i kamioni, svaka s vlastitim prednostima i nedostacima. Izgradnja nove infrastrukture za prijevoz vodika zahtijeva značajna ulaganja, dok korištenje postojećih infrastrukture zahtijeva prilagodbe i dodatne tehnologije. Sigurnosni protokoli su ključni za smanjenje rizika povezanih s prijevozom vodika [9].

Ukupno gledano, skladištenje i prijevoz vodika zahtijevaju integrirani pristup koji uključuje tehnološki napredak, sigurnosne mjere i razvoj infrastrukture kako bi se osigurala održiva i široka primjena vodika kao goriva.

## **2.4. TEHNOLOŠKI RAZVOJ BRODOVA NA VODIK**

Proizvodnja brodova predstavlja sveobuhvatan industrijski sektor koji pruža tehnologiju i opremu za brodarsku industriju, razvoj pomorskih resursa i izgradnju nacionalne obrane. Ima vodeću ulogu u razvoju i proširenju ključnih industrija poput čelika, petrokemije, tekstila, proizvodnje opreme i elektroničke informatike [10]. Nadalje, predstavlja važan čimbenik u provođenju strategije izgradnje snažne brodarske industrije unutar Kine. Strateški plan "Made in China 2025" uvrstio je visokotehnološke brodove među deset prioriteta za značajni razvoj [11].

Tradicionalni pogonski uređaji za brodove, poput dizelskih motora, parnih turbina i plinskih turbina, općenito proizvode energiju potrošnjom dizel goriva. Međutim, s tim su povezani značajni problemi, uključujući nisku energetske učinkovitost goriva (35%), smanjeni komfor

zbog visokih razina vibracija i buke, te proizvodnju velike količine stakleničkih plinova, dušikovih oksida, sumporovih oksida i čestica. Nadalje, nafta je ograničeno obnovljivo fosilno gorivo; istraživanja su pokazala da fosilna goriva ne mogu podržati održivi razvoj ljudskog života. Zbog toga je istraživanje usmjereno na razvoj novih, čistih, učinkovitih i održivih energetske tehnologije za pogon zelenih brodova postalo važno [12].

Vodikove gorive ćelije ključne su za proizvodnju zelene energije. One generiraju energiju putem elektrokemijske reakcije direktnim pretvaranjem kemijske energije proizvedene iz vodikovog goriva i oksidanta u električnu energiju. Vodikove gorive ćelije imaju brojne prednosti, uključujući visoku energetske učinkovitost, visoku energijsku gustoću, nisku razinu vibracija i buke, te nulte emisije. Osim toga, vodik je obnovljivi izvor goriva koji se može dobiti korištenjem zelenih metoda proizvodnje energije poput solarnih, vjetroelektrana, hidroelektrana i bioloških izvora energije [12, 13]. Primjena vodikovih gorivih ćelija kao pogonskog uređaja na brodovima omogućava postizanje energetske učinkovitosti, nultih emisija i poboljšanja komfora na brodovima. Vodikove gorive ćelije su idealan pogonski uređaj koji zadovoljava sve veću potražnju tržišta za zelenim brodovima [14].

Razvoj brodova na vodik predstavlja revolucionarni pomak u pomorskoj industriji, nudeći održivu alternativu tradicionalnim fosilnim gorivima. Njihova tehnologija gorivih ćelija omogućuje konverziju vodika i kisika u čistu električnu energiju putem elektrokemijskih reakcija, što rezultira gotovo potpunim izostankom emisija štetnih plinova, a jedini nusprodukt je čista voda. Ova značajka čini brodove na vodik izuzetno privlačnim za smanjenje ekološkog otiska i zaštitu okoliša [15].

Ključni tehnološki izazov pri razvoju brodova na vodik je pohranjivanje vodika. S obzirom na visoku energiju koju vodik nosi, postizanje sigurnog i efikasnog skladištenja predstavlja kompleksan tehnički problem. Razvijaju se različite tehnologije, uključujući kompozitne spremnike pod pritiskom i tekuće vodikove spremnike, kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost [16].

Električni pogonski sustavi, integrirani s gorivim ćelijama, ključni su za efikasnu upotrebu energije na brodovima na vodik. Ovi sustavi omogućuju pretvaranje električne energije u pokretačku snagu s minimalnim gubicima, čime se povećava energetska učinkovitost i smanjuju operativni troškovi. [17, 18, 19].

Integracija brodova na vodik s ostalim pomorskim sustavima, poput navigacijskih sustava, upravljanja teretom i sigurnosnih sustava, ključna je za osiguranje sigurne i učinkovite plovidbe. Potrebna je koordinacija između različitih tehničkih sustava kako bi se osigurala funkcionalnost i pouzdanost cijelog plovila [17]. Uz tehnički napredak, infrastruktura za punjenje vodika također je ključna komponenta za uspješnu implementaciju brodova na vodik. Izgradnja punionica duž obale i u lukama omogućuje punjenje gorivih spremnika brodova, čime se osigurava neprekidna opskrba vodikom za plovidbu. Nadalje, kontinuirano istraživanje i inovacija su od suštinskog značaja za daljnji razvoj tehnologija brodova na vodik. Poboljšanje učinkovitosti gorivih ćelija, razvoj novih materijala za pohranu vodika i optimizacija električnih sustava ključni su za postizanje veće performanse i ekonomske održivosti ovih plovila [18].

Konačno, usklađenost s pomorskim regulativama i standardima od vitalnog je značaja kako bi se osigurala sigurnost plovidbe i zaštita okoliša. Ovo uključuje implementaciju propisa o emisijama, sigurnosnim standardima i protokolima za postupanje s vodikom kako bi se minimizirali rizici i osigurala održiva integracija brodova na vodik u globalni pomorski sektor [19].

Sukladno navedenom neke od razvijenih zemalja su uzastopno donijele seriju planova i standarda kako bi usmjerile i podržale razvoj korištenja vodikovih gorivih ćelija u brodarскоj industriji. Pa tako, u Sjedinjenim Američkim Državama istraživanje i razvoj vodikove energije započelo je 1973. tijekom naftne krize [20]. U isto vrijeme osnovana je Međunarodna asocijacija za vodikovu energiju, a prva međunarodna konferencija na tu temu održana je u Miamiu na Floridi. Američka agencija za istraživanje i razvoj energije podržavala je program istraživanja vodikove energije kao rješenje neuspješnog programa samodostatnosti u energiji. Godine 2015., američko Ministarstvo energetike podnijelo je Kongresu Izvještaj o tržištu tehnologija gorivih ćelija za 2015. godinu i snažno ulagalo u razvoj napredne tehnologije vodikovih gorivih ćelija. Godine 2016., američko Ministarstvo energetike izvijestilo je da zajednički razvija industrijske specifikacije za vodikove gorive ćelije u brodarstvu i stanicama za vodikovo punjenje u vezi s okolišnim čimbenicima, sigurnošću i licenciranjem [20].

Nadalje, 2009. godine u Japanu, Ministarstvo zemlje, infrastrukture, prometa i turizma formuliralo je Srednjoročni i Dugoročni Plan istraživanja za industriju brodogradnje, u kojem se navodi da bi se gorivne ćelije trebale koristiti kao električni pogonski sustav za brodove kako bi se smanjile emisije. Zahvaljujući prednostima japanske tehnologije gorivnih ćelija,

razvoj je brzo napredovao u području brodarstva. Godine 2017., japansko društvo za klasifikaciju ClassNK izdalo je smjernice za sigurnu izgradnju i rad brodova za prijevoz tekućeg vodika. Ove smjernice stvorile su trenutne pomorske propise i regulative u području pogona na vodik [20].

Zatim, Južna Koreja koja je u srednjoročnom i dugoročnom Strateškom planu za razvoj industrije brodogradnje, formuliranom od strane Ministarstva za znanost, znanje i ekonomiju 2010. godine, trebala koristiti zelenu energiju poput gorivih ćelija u industriji brodogradnje [21]. Godine 2015., vlada je pokrenula i uložila 16 milijardi južnokorejskih vona (KRW) u projekt broda na gorivne ćelije, koji je vodila korejska agencija za registraciju Korean Register za odgovarajuća istraživanja i razvoj [21]. Velike brodogradilišta i tvrtke u Južnoj Koreji, poput Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, POSCO Power, Samsung Heavy Industry i STX brodogradnja, sudjelovale su u vladinim projektima istraživanja i razvoja ili neovisnom istraživanju i razvoju morskih gorivnih ćelija. Njemačka, Sjedinjene Američke Države, Norveška, Japan i druge razvijene zemlje, uključujući one u Europskoj uniji, predvodnici su u području razvoja tehnologije pogona vodikovih gorivnih ćelija za brodove HFCTPDS. Uspješno su demonstrirali i primijenili tehnologiju vodikovih gorivnih ćelija [21].

Također, na razini Europske unije, godine 2007., Europska unija financirala je prvi projekt nultih emisija brodova (engl. *Zero Emissions Ships - ZEMships*) na svijetu za komercijalni putnički brod. Brod za 100 putnika ima hibridni način pogona i integrira dvije vodikove gorive ćelije s vršnom snagom od 48 kW i 560 V olovne baterije [22]. U Njemačkoj je 2008. godine razvijen putnički brod "Alsterwasser" kapaciteta 100 putnika koji koristi vodikovu gorivu ćeliju kao glavni pogonski uređaj. Brod može proizvesti 100 kW snage i ima maksimalnu brzinu od 14 km/h (Slika 1) [22]. Od svog predstavljanja, Alsterwasser je prevezao više od 14 000 putnika.



**Slika 1. Prikaz broda "Alsterwasser"**

Izvor: [22].

Zatim, u Francuskoj je 2017. godine izgrađen brod "Energy Observer" (Slika 2) koji se napaja vodikom, vjetrom i sunčevom energijom. Brod ima duljinu i težinu od 30 m odnosno 20 t, te sustav vodikove gorive ćelije od 22 kW [22].



**Slika 2. Brod "Energy Observer"**

Izvor: [22].

Nizozemska također predstavlja jedan primjer sa brodom "Fuel Cell Boat Amsterdam" izgrađenog 2009. godine, kapaciteta 100 putnika za kanalski turizam u Amsterdamu. Brod je opremljen sustavom vodikove gorive ćelije od 60–70 kW, koji koristi visokotlačni vodik kao gorivo i može ploviti 9 sati brzinom od 7 čvorova [22]. Tu je i Norveška koja je iste godine surađivala s Wartsilom i klasifikacijskim društvom MTU kako bi razvila brod za opskrbu offshore područja vodikom "Viking Lady" (Slika 3) [22]. Snaga sustava vodikove gorive ćelije iznosi 320 kW, a gorivo je tekući prirodni plin [22]. To je bio prvi operativni brod na vodikovu gorivu ćeliju.



**Slika 3. Brod "Viking Lady"**

Izvor: [22].

## **2.5. PREDNOSTI I IZAZOVI BRODOVA NA VODIK**

Brodovi na vodik donose sa sobom niz prednosti, ali isto tako i izazova koji zahtijevaju pažljivo razmatranje i rješavanje.

Prednosti brodova na vodik [23]:

- **Ekološka održivost:**

Jedna od najznačajnijih prednosti brodova na vodik je njihova ekološka prihvatljivost. Vodikove gorive ćelije proizvode električnu energiju iz vodika i kisika, ne stvarajući nikakve štetne emisije. Umjesto toga, jedini nusprodukt je čista voda, što znači da su brodovi na vodik potpuno bez emisija štetnih plinova kao što su CO<sub>2</sub>, dušikovi oksidi i sumporni spojevi.

- **Visoka energetska učinkovitost:**

Vodikove gorive ćelije imaju visoku energetska učinkovitost u pretvaranju kemijske energije vodika i kisika u električnu energiju. To rezultira većim postotkom iskorištenja energije u usporedbi s tradicionalnim pogonskim sustavima, što može dovesti do smanjenja potrošnje goriva i operativnih troškova.

- **Smanjenje buke i vibracija:**

Brodovi na vodik imaju tendenciju proizvoditi manje buke i vibracija u usporedbi s brodovima koji koriste konvencionalne pogonske sustave poput dizelskih motora. To može poboljšati udobnost putnika i osoblja na brodu te smanjiti negativan utjecaj na okoliš i morski život.

- **Obnovljivi izvor goriva:**

Vodik je obnovljivi izvor goriva koji se može proizvoditi korištenjem obnovljivih izvora energije poput sunca, vjetra i hidroelektrane. To znači da brodovi na vodik mogu koristiti gorivo koje se može obnavljati, što doprinosi smanjenju ovisnosti o ograničenim fosilnim gorivima.

Izazovi korištenja brodova na vodik [24]:

- **Pohranjivanje vodika:**

Sigurno i učinkovito pohranjivanje vodika na brodu predstavlja jedan od glavnih izazova. Vodik je vrlo lagan i ima visoku energetska gustoću, što znači da zahtijeva posebne tehnologije i spremnike kako bi se osigurala sigurna pohrana bez rizika od eksplozija ili curenja.

- **Infrastruktura za punjenje:**

Za masovnu implementaciju brodova na vodik potrebna je adekvatna infrastruktura za punjenje vodikom duž obale i u lukama. To uključuje izgradnju punionica, ali i logistiku za transport i skladištenje vodika, što može predstavljati značajan izazov u pogledu investicija i planiranja.

- **Troškovi:**

Iako su brodovi na vodik ekološki prihvatljivi i energetska učinkoviti, trenutno su skuplji za izgradnju i operaciju u usporedbi s tradicionalnim brodovima. Visoki troškovi tehnologije vodikovih gorivih ćelija i infrastrukture mogu predstavljati prepreku širokoj implementaciji ovih brodova.

- **Tehnološki razvoj:**



Iako je tehnologija vodikovih gorivih ćelija napredovala, i dalje postoje izazovi u pogledu poboljšanja učinkovitosti, smanjenja troškova i povećanja pouzdanosti. Daljnji tehnološki razvoj i istraživanje su ključni za prevladavanje tih izazova i postizanje šireg usvajanja brodova na vodik.

Unatoč izazovima, brodovi na vodik imaju potencijal da postanu važan dio održive budućnosti pomorskog prometa, pružajući ekološki prihvatljivu i energetske učinkovitu alternativu tradicionalnim pogonskim sustavima.

### **3. LUČKA INFRASTRUKTURE ZA PRIHVAT BRODOVA NA VODIK**

Lučka infrastruktura za prihvatanje brodova na vodik predstavlja ključni aspekt u tranziciji pomorskog sektora prema održivijim i ekološki prihvatljivijim gorivima. Razvoj ove infrastrukture uključuje više elemenata koji osiguravaju sigurnost, učinkovitost i ekonomičnost operacija s vodikom. U nastavku rada dan je opći pregled potrebnih komponenti i njihovih funkcija.

#### **3.1. TERMINALI ZA UKRCAJ I ISKRCAJ: DOKOVI I PRIVEZNE POSTAJE, PUMPE I CJEVOVODI**

Terminali za ukrcaj i iskrcaj, odnosno dokovi i privezne postaje, pumpe i cjevovodi, ključne su komponente lučke infrastrukture potrebne za prihvatanje brodova na vodikov pogon. Ovi elementi predstavljaju ključnu komponentu u olakšavanju prijelaza pomorske industrije na čišće i održivije izvore goriva. Osiguravanje sigurnosti, učinkovitosti i isplativosti rada s vodikom zahtijeva pažljivo planiranje i poštivanje strogih sigurnosnih propisa prilikom projektiranja i izgradnje ovih ključnih infrastrukturnih komponenti [25, 26].

Dokovi i privezne postaje su ključna komponenta u procesu ukrcaja i iskrcaja vodika, služeći kao bitna sastavnica infrastrukture. Imperativ je da se te strukture pažljivo planiraju i konstruiraju kako bi se prilagodile jedinstvenim potrebama plovila koja prevoze vodik. Te

potrebe obuhvaćaju čimbenike kao što su otpornost na koroziju, trajnost pri različitim temperaturama i pritiscima te implementaciju najsvremenijih sigurnosnih protokola.

Za sigurno pristajanje brodova koji koriste vodik potrebno je da dokovi imaju posebno dizajnirane privezne stanice koje mogu sigurno primiti ta plovila. Te prilagodbe moraju uključivati izdržljive točke za sidrenje i sustave koji mogu apsorbirati kinetičku energiju generiranu tijekom procesa pristajanja, čime se smanjuje mogućnost oštećenja i brodova i okolne infrastrukture. Osim toga, materijali korišteni u konstrukciji ovih stanica za privez moraju biti u stanju izdržati ekstremne uvjete povezane s rukovanjem vodikom, kao što su niske temperature i visoki pritisci. To zahtijeva upotrebu materijala poput nehrđajućeg čelika i posebnih legura koji imaju potrebnu otpornost na te čimbenike okoliša [27].

Sigurnosne mjere su od najveće važnosti jer je vodik vrlo zapaljiv i eksplozivan. Napredni sustavi za otkrivanje curenja i postupci za hitnu evakuaciju postavljeni su na dokovima i stanicama za privez kako bi se osigurala sigurnost. Detektori curenja strateški su postavljeni za brzo otkrivanje bilo kakvih abnormalnosti, a integrirani sigurnosni sustavi omogućuju automatsko isključivanje prijenosnih vodova ako se otkrije curenje.

Logističke operacije uključuju detaljne planove koji ocrtavaju posebne postupke za siguran prijevoz i rukovanje vodikom. Ovi postupci pridržavaju se globalno priznatih sigurnosnih propisa i obuhvaćaju rutinske procjene i održavanje logističke infrastrukture kako bi se zajamčila njezina pouzdanost i sigurnost.

Pumpe i cjevovodi predstavljaju vitalnu funkciju u transportu vodika od brodova do skladišta na kopnu. Za te je sustave bitno da budu projektirani za učinkovito rukovanje vodikom pri različitim temperaturama i pritiscima, ovisno o tome je li vodik u tekućem ili komprimiranom stanju [28].

Tehničke specifikacije za pumpe koje se koriste za prijenos vodika zahtijevaju specijalizirane dizajne za rad s kriogenim tekućinama ili visokotlačnim plinovima. Kriogene pumpe, koje rade na temperaturama nižim od  $-253^{\circ}\text{C}$ , moraju biti opremljene sustavima za kontrolu temperature i tlaka kako bi se osigurao siguran prijenos vodika. S druge strane, kompresorske pumpe za komprimirani vodik moraju biti visoko učinkovite, otporne na habanje i sposobne zadržati svoju učinkovitost čak i pod uvjetima visokog tlaka. Za ove je crpke ključno da se mogu nositi s jedinstvenim izazovima rada s vodikom bez ugrožavanja njihove izvedbe [28, 29].

Kako bi se osigurao učinkovit i siguran rad cjevovoda, imperativ je da su konstruirani korištenjem materijala koji mogu izdržati koroziju i ekstremne temperature. Najčešće korišteni materijali za ovu svrhu uključuju nehrđajući čelik i posebne legure, poznate po svojoj izdržljivosti i otpornosti na čimbenike okoliša. Osim toga, cjevovodi bi trebali biti pravilno izolirani kako bi se spriječio gubitak topline i minimizirala kondenzacija, što potencijalno može dovesti do stvaranja leda i posljedične štete na infrastrukturi. Kako bi se dodatno poboljšale sigurnosne mjere, sustavi za otkrivanje curenja integrirani su u cjevovode kako bi se stalno pratila prisutnost plinovitog vodika. U slučaju curenja, ovi sustavi odmah upozoravaju operatere i automatski zatvaraju ventile kako bi spriječili bilo kakve opasne situacije [30].

Pridržavanje strogih sigurnosnih standarda imperativ je u osiguravanju zaštite pojedinaca, imovine i prirodnog okruženja unutar pomorske industrije. Međunarodna pomorska organizacija (IMO) nudi opsežne smjernice i pravila koja ocrtavaju sigurnosne protokole za korištenje vodika u pomorskim operacijama. Ovi protokoli obuhvaćaju specifikacije za razvoj i uspostavu infrastrukture, operativne protokole i strategije za izvanredne situacije. Pridržavanje ovih propisa ključno je za jamčenje zaštite i dobrobiti svih dionika uključenih u aktivnosti povezane s vodikom na moru.

Kako bi bili u skladu s međunarodnim propisima koje je postavila Međunarodna pomorska organizacija (IMO), terminali su dužni primijeniti mjere kontrole pristupa kako bi se spriječilo neovlaštenim osobama da uđu u prostorije i sudjeluju u potencijalno opasnim aktivnostima. Ove mjere obično uključuju korištenje fizičkih barijera, nadzornih kamera i sustava za provjeru identiteta osoblja [31, 32].

Sustavi za gašenje požara koji su posebno dizajnirani za borbu protiv požara vodika ključni su za osiguravanje sigurnosti u raznim industrijama. Ovi specijalizirani sustavi obično se sastoje od sustava za raspršivanje vode, opreme za pjenu i specijaliziranih kemikalija koje su se pokazale učinkovite u gašenju požara vodikom.

Imperativ je da osoblje prolazi redovitu obuku i aktivno sudjeluje u vježbama evakuacije kako bi se zajamčila brza i učinkovita reakcija u slučaju opasnosti. Planovi evakuacije trebali bi biti detaljno detaljizirani, ocrtavajući sve bitne postupke za siguran izlazak iz prostorija tijekom krize.

Suradnja i koordinacija između raznolike skupine stručnjaka i organizacija, poput inženjera, sigurnosnih stručnjaka i regulatornih tijela, bitna je za uspješan razvoj i implementaciju vodikove infrastrukture u pomorskoj industriji. Ovaj zajednički napor jamči da su sva pitanja sigurnosti i učinkovitosti adekvatno zadovoljena, utirući put za siguran i ekološki prihvatljiv prijelaz na korištenje vodikovog goriva u pomorskom prijevozu.

### **3.2. SKLADIŠTENJE VODIKA – SPREMNICI ZA VODIK, HLAĐENJE I KOMPRESIJA**

Sustavi za skladištenje vodika su ključni element infrastrukture u lučkim područjima koja podržavaju korištenje vodika kao alternativnog goriva. Ovi sustavi omogućuju sigurno i učinkovito pohranjivanje velikih količina vodika koje su potrebne za opskrbu brodova, vozila ili industrijskih postrojenja [33, 34].

Postoje različite tehnologije i metode skladištenja vodika, a neke od najčešćih uključuju[35]:

- **Skladištenje pod pritiskom:**

Vodik se skladišti u spremnicima ili cisternama pod visokim tlakom. Ova metoda omogućuje skladištenje velike količine vodika na relativno malom prostoru, ali zahtijeva čvrste spremnike koji su otporni na visoki tlak.

- **Skladištenje u tekućem stanju:**

Vodik se ohladi na vrlo nisku temperaturu ( $-253^{\circ}\text{C}$ ) kako bi prešao u tekuće stanje, što omogućuje pohranu veće količine vodika u manjem volumenu. Ova metoda zahtijeva složen sustav hlađenja i izolacije.

- **Skladištenje u metalnim hidridima:**

Vodik se apsorbira u metalne spojeve, poput legura titana ili magnezija, koji djeluju kao spužve za pohranu vodika. Ova metoda omogućuje sigurno skladištenje vodika pri nižem tlaku i stabilnim uvjetima temperature.

- **Skladištenje u kemijski vezanom obliku:**

Vodik se vezuje za određene spojeve, poput amonijaka ili metanola, koji se kasnije mogu razgraditi kako bi oslobodili vodik prema potrebi. Ova metoda omogućuje sigurno skladištenje vodika u obliku kemijski stabilnih spojeva.

U kontekstu lučke infrastrukture, sustavi za skladištenje vodika obično uključuju velike spremnike ili spremnike smještene na obali ili na plutajućim platformama u blizini luka. Ovi sustavi moraju biti opremljeni sigurnosnim sustavima kako bi se spriječili rizici od curenja ili eksplozija. Također, važno je osigurati da su sustavi za skladištenje dovoljno otporni na vanjske utjecaje, poput udara brodova ili vremenskih nepogoda.

Nadalje, hlađenje igra ključnu ulogu u održavanju vodika u tekućem obliku, što je ključni čimbenik za njegovo učinkovito skladištenje i transport. Ovaj proces zahtijeva upotrebu kriogenih rashladnih sustava sposobnih za postizanje i održavanje temperatura nižih od  $-253^{\circ}\text{C}$ , vitalnih za transformaciju vodika u tekuće stanje [36]. Kriogene sustave karakteriziraju zamršeni termodinamički procesi koji se koriste za izdvajanje topline i održavanje ultra niskih temperatura. Ovi sustavi se sastoje od više komponenti koje surađuju kako bi se postigla željena razina hlađenja. Kriogeni kompresori koriste povišeni tlak za kondenzaciju plinova, koji se zatim hlade i dovode na kriogene temperature ekspanzijom. Bitno je da kompresori budu izrađeni od materijala koji mogu podnijeti jaku hladnoću i visoke tlakove [37].

Ekspanzijski ventili se koriste u procesu za regulaciju ekspanzije komprimiranog vodika, što dovodi do daljnjeg hlađenja. Kontrolom brzine ekspanzije, ovi ventili igraju ključnu ulogu u održavanju precizne kontrole temperature unutar sustava.

Izmjenjivači topline igraju ključnu ulogu u prijenosu topline s vodika na rashladno sredstvo, osiguravajući učinkovito uklanjanje topline i održavanje temperature vodika na niskoj razini. Ovi sustavi su nezamjenjivi za učinkovito upravljanje toplinom u različitim primjenama [36].

Osiguravanje točnosti i pouzdanosti u sustavima kontrole temperature ključno je za održavanje dosljedne i stabilne temperature za tekući vodik. To uključuje implementaciju preciznih i pouzdanih mehanizama koji mogu učinkovito regulirati i nadzirati temperaturu vodika, jamčeći njegove optimalne uvjete za skladištenje i korištenje. Bez ove razine točnosti i pouzdanosti, integritet i funkcionalnost sustava tekućeg vodika mogli bi biti ugroženi, što bi dovelo do potencijalnih opasnosti i neučinkovitosti. Stoga je imperativ dati prioritet točnosti i

pouzdanosti sustava za kontrolu temperature kako bi se osiguralo sigurno i učinkovito rukovanje tekućim vodikom [36].

Redovito održavanje i kalibracija ključni su za osiguranje učinkovitosti i sigurnosti sustava. To uključuje rutinske provjere i podešavanja kako bi se osiguralo da senzori i kontrolni mehanizmi ispravno funkcioniraju i daju točna očitavanja. Kompresija je proces smanjenja volumena plina, kao što je vodik, kako bi se lakše skladištio i transportirao. Ovo je osobito važno za plinove koji se moraju skladištiti pod visokim tlakom. Sustavi automatskog podešavanja dizajnirani su za automatsku regulaciju rada rashladnih sustava na temelju podataka dobivenih temperaturnim sensorima. To pomaže u održavanju stabilne temperature unutar sustava. Kako bi učinkovito komprimirali vodik, kompresori moraju biti visoko učinkoviti i izdržljivi. Kompresori koji se obično koriste u tu svrhu mehanički su po prirodi, koriste klipne ili rotacijske mehanizme za postizanje potrebnih visokih tlakova. Osim toga, materijali koji se koriste u ovim kompresorima moraju biti u stanju izdržati i ekstremne pritiske koji su uključeni i kemijsku reaktivnost vodika [37].

Klipni kompresori koriste klipove za podizanje tlaka plinova, što ih čini cijenjenima zbog njihove sposobnosti postizanja iznimno visokih tlakova. S druge strane, rotacijski kompresori koriste rotacijske elemente za komprimiranje plinova, nudeći veću učinkovitost za kontinuiranu upotrebu i duži životni vijek. Kada je riječ o sigurnosnim sustavima, kompresijski sustavi moraju integrirati različite sigurnosne značajke kako bi se jamčile sigurne i pouzdane operacije [37].

Ventili za smanjenje tlaka bitne su komponente koje otpuštaju prekomjerni tlak kako bi se izbjeglo preopterećenje i potencijalne eksplozije. Senzori za otkrivanje curenja odgovorni su za prepoznavanje curenja vodika i pokretanje sigurnosnih mjera. Ugrađeni su sustavi za automatsko isključivanje radi zaustavljanja rada kompresora u slučaju preopterećenja ili kvarova. Redovito održavanje, kao što su inspekcije, zamjena istrošenih dijelova i kalibracija sigurnosnih mehanizama, imperativ je za osiguravanje dugovječnosti i sigurnosti kompresora. Dodatno, kontrola tlaka unutar spremnika stlačenog vodika kritičan je aspekt održavanja sigurnosti [37].

Kontrolni ventili i nadzorni sustavi predstavljaju ključnu funkciju u održavanju sigurnih razina tlaka unutar spremnika. Ovi sustavi koriste kontrolne ventile i uređaje za nadzor tlaka za kontinuirano praćenje i podešavanje razine tlaka kako bi se spriječile potencijalne

opasnosti. Korištenjem ovih alata operateri mogu osigurati da tlak unutar spremnika u svakom trenutku ostane unutar sigurnih granica [37].

Senzori tlaka su uređaji koji stalno prate razine tlaka unutar spremnika i kompresijskog sustava, zahtijevajući visoku razinu točnosti i pouzdanosti. Sustavi automatske kontrole odgovorni su za podešavanje tlaka kao odgovor na podatke senzora kako bi se održala sigurna razina tlaka u spremniku. Sigurnosni ventili su mehanizmi dizajnirani za oslobađanje bilo kakvog viška tlaka kako bi se spriječilo preopterećenje sustava [37].

Uvođenje svih ovih sustava za skladištenje vodika u lučku infrastrukturu omogućuje lučkim poduzećima i terminalima da podrže prijelaz prema održivijim oblicima energije i doprinesu globalnim naporima za smanjenje emisija stakleničkih plinova.

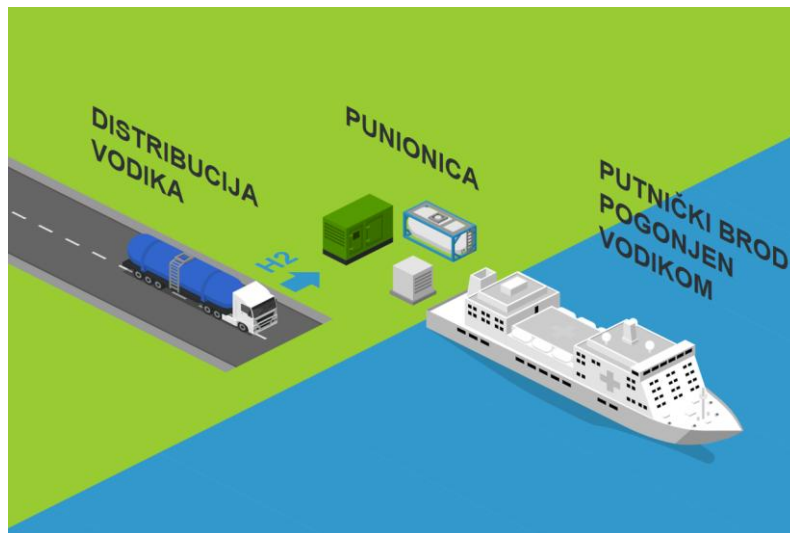
### **3.3. BUNKERING – POSTAJE ZA PUNJENJE GORIVA, SIGURNOSNA OPREMA – DETEKTORI CURENJA, VATROGASNA OPREMA**

Punjenje je bitan proces ukrcajaukrcaja vodikovog goriva u brodove, čime se osigurava njihov siguran i učinkovit rad. To uključuje korištenje specijaliziranih postaja za gorivo, poznatih kao stanice za punjenje goriva, zajedno s potrebnom sigurnosnom opremom za olakšavanje prijenosa goriva. Pravilna izvedba bunkeringa ključna je za nesmetano funkcioniranje brodova i cjelokupnog pomorskog gospodarstva.

Punionice vodikom predstavljaju sve važniji element u lučkoj infrastrukturi, posebno s obzirom na rastuću važnost vodika kao alternativnog energentu u svijetu. Ove punionice omogućuju brodovima koji koriste vodik kao gorivo da se opskrbe potrebnom količinom goriva za svoje putovanje [38].

U kontekstu lučke infrastrukture što prikazuje slika 4. punionice vodikom obično uključuju instalacije za skladištenje, punjenje i distribuciju vodika. Skladištenje vodika zahtijeva posebne sigurnosne mjere zbog visoke zapaljivosti i potencijalne opasnosti. Stoga, punionice vodikom moraju biti opremljene sustavima za sigurno skladištenje i rukovanje vodikom. Osim skladišnih kapaciteta, punionice vodikom također uključuju sustave za punjenje brodova s vodikom. Ovi sustavi obično uključuju visokotlačne cijevi ili crijeva povezana s brodovima kako bi se omogućio siguran i učinkovit prijenos vodika s punionice na brod [38].

Važno je istaknuti da su punionice vodikom važan korak prema održivoj i ekološki prihvatljivoj pomorskoj industriji. Korištenje vodika kao goriva može značajno smanjiti emisije stakleničkih plinova i doprinijeti globalnim naporima za smanjenje onečišćenja okoliša. Stoga, integracija punionica vodikom u lučku infrastrukturu predstavlja ključni element u prijelazu prema energetski učinkovitijoj i ekološki održivijoj pomorskoj industriji.



**Slika 4. Prikaz skice punionice vodikom za brodove**

Izvor: <https://www.vecernji.hr/vijesti/putnicki-brod-na-vodik-stize-na-jadran-1733524>

Nadalje, osim punionica, ključnu infrastrukturu čini sigurnosna i vatrogasna oprema. Sigurnosna oprema ključna je tijekom operacija punjenja bunkera radi zaštite osoblja, plovila i struktura. Neophodno je imati pri ruci osnovnu sigurnosnu opremu kao što su detektori curenja i aparati za gašenje požara kako biste spriječili potencijalne opasnosti. Ova oprema igra ključnu ulogu u osiguravanju sigurnosti pojedinaca i imovine uključenih u proces punjenja. Korištenje detektora curenja ključno je za brzo identificiranje postojanja vodika u atmosferi, čime se sprječavaju sve potencijalne opasnosti koje bi mogle nastati. Ovi uređaji igraju ključnu ulogu u osiguravanju sigurnosti i sprječavanju nezgoda uzrokovanih curenjem. Različite vrste detektora, kao što su elektronički senzori i optički detektori, koriste se za otkrivanje čak i najmanjih količina vodika. Ovi detektori strateški su postavljeni u stanicama za punjenje goriva, skladišnim spremnicima i cjevovodima kako bi se osiguralo temeljito praćenje. Kada se otkrije curenje, detektori aktiviraju zvučne i vizualne alarme i upozoravaju operativne centre za brzi odgovor [39].



Osim toga, specijalizirana oprema za gašenje požara ključna je za gašenje požara povezanih s vodikom na stanicama za punjenje. Aparati za gašenje požara su uređaji koji sadrže kemikalije i agense posebno dizajnirane za gašenje požara vodikom, kao što su pjena i suhi kemijski aparati za gašenje požara [39]. Sustavi za prskanje vode koriste vodu za hlađenje područja zahvaćenog požarom, zaustavljajući njegovo širenje i snižavajući temperaturu obližnjih zgrada. U bunkerskim stanicama obično postoje vatrogasne postaje opremljene svim potrebnim alatima i sredstvima za brzo reagiranje na požare.

### **3.4. LOGISTIČKI I OPERATIVNI CENTRI- CENTRI ZA NADZOR I UPRAVLJANJE OPERACIJAMA**

Logistički i operativni centri ključna su središta za nadzor i kontrolu operacija unutar lučke infrastrukture. Imaju zadatak nadzirati, koordinirati i nadzirati sve aktivnosti povezane sa skladištenjem, transportom, skladištenjem i sigurnosnim protokolima vodika. Ovi centri igraju ključnu ulogu u osiguravanju učinkovitog i sigurnog rada svih procesa povezanih s vodikom.

Funkcije logističkih i operativnih centara obuhvaćaju širok raspon zadataka, a jedna od ključnih odgovornosti je kontrola operacija. Ovi centri opremljeni su vrhunskom tehnologijom i sustavima koji omogućuju nadzor i praćenje svih operacija u stvarnom vremenu. To uključuje nadzor kretanja robe, upravljanje razinama zaliha, koordinaciju transportnih ruta i osiguravanje pravovremene isporuke proizvoda. Korištenjem ovih naprednih sustava, logistički i operativni centri mogu učinkovito usmjeriti operacije, poboljšati učinkovitost i brzo riješiti sve potencijalne probleme koji se mogu pojaviti. Ova razina kontrole ključna je u osiguravanju glatkog i uspješnog rada opskrbnog lanca [40].

Centri neprestano promatraju cjevovode i spremnike putem senzora i sustava daljinskog nadzora kako bi pratili tlak, temperaturu i razine vodika. Oni također nadgledaju operacije punjenja goriva, osiguravajući sigurno i učinkovito punjenje brodova vodikom. Sigurnost je glavni prioritet za operativne centre, budući da su oni zaduženi za implementaciju sigurnosnih protokola i rukovanje svim hitnim situacijama koje se mogu pojaviti.

Operativni centri koriste sofisticirane sustave za otkrivanje curenja koji odmah pokreću alarme i provode sigurnosne postupke nakon otkrivanja curenja vodika. U slučaju nesreća ili

izvanrednih situacija, operativni centri nadziru proces evakuacije, aktiviraju sigurnosne mjere i koordiniraju s vatrogasnim i spasilačkim ekipama. Učinkovita koordinacija i komunikacija između različitih odjela, kao i s osobljem na terenu, ključni su za osiguravanje besprijekornog rada [40].

Komunikacijski sustavi postavljeni u centrima omogućuju besprijekornu i stalnu komunikaciju između operativnog centra, terenskog osoblja i brodova. Dodatno, koordinacija logistike ključna je funkcija operativnih centara, budući da oni nadziru raspodjelu resursa, upravljanje zalihama i planiranje transporta. Upotrebom naprednih tehnologija prikupljanja i analize podataka, operativni centri mogu kontinuirano analizirati podatke i optimizirati procese kako bi poboljšali operativnu učinkovitost.

Što se tiče tehnologije i opreme, logistički i operativni centri oslanjaju se na sofisticirane softverske sustave kako bi pojednostavili i nadgledali svoje svakodnevne aktivnosti. Ovi sustavi su ključni za učinkovito i učinkovito upravljanje operacijama. Proces prikupljanja podataka uključuje korištenje različitih senzora i nadzornih sustava za prikupljanje informacija o različitim aspektima operacija, kao što su potrošnja energije, učinkovitost transporta i sigurnosni incidenti. Ti se podaci zatim podvrgavaju temeljitoj analizi i izvješćivanju od strane operativnih centara, koristeći specijalizirane softverske alate za otkrivanje obrazaca i generiranje izvješća koja pomažu u donošenju odluka na temelju dobrih informacija [40].

Sustavi nadzora i kontrole odnose se na softver koji omogućuje praćenje operacija u stvarnom vremenu, upravljanje resursima i koordinaciju aktivnosti. Analitički alati koriste se za analizu podataka kako bi se poboljšala učinkovitost procesa, smanjili troškovi i poboljšala sigurnost. Osim toga, operativni centri koriste razne senzore i uređaje za prikupljanje podataka i nadgledanje operacija.

Senzori tlaka i temperature koriste se za dosljedno praćenje uvjeta unutar spremnika i cjevovoda, osiguravajući da svi parametri ostanu unutar sigurnih granica. Detektori curenja koriste se za promptnu identifikaciju prisutnosti vodika u zraku i pokretanje sigurnosnih mjera. Dodatno, napredna komunikacijska infrastruktura olakšava kontinuiranu povezanost između operativnog centra, osoblja na terenu i brodova [40].

Radijske i satelitske komunikacijske tehnologije igraju ključnu ulogu u uspostavljanju pouzdanih veza, čak i u izoliranim regijama i izazovnim okruženjima. Dodatno, digitalni

komunikacijski sustavi olakšavaju brzu i sigurnu razmjenu informacija među različitim pojedincima ili grupama.

### 3.5. SIGURNOSNI STANDARDI I PROPISI

Sigurnosni standardi i propisi su ključni element lučke infrastrukture jer osiguravaju siguran i učinkovit rad luka te štite živote, imovinu i okoliš. U tu svrhu, postoje razni propisi i standardi koji se primjenjuju u luci kako bi se osigurala zaštita od različitih prijetnji i opasnosti. U nastavku se razmatra šest ključnih aspekata sigurnosti u luci: zaštita od požara, sigurnost plovidbe, zaštita okoliša, ograničenje pristupa, protuterorizam i obuka osoblja [41].

Prvo, zaštita od požara ključna je komponenta sigurnosti u luci. Propisi za zaštitu od požara obuhvaćaju instalaciju i održavanje sustava za gašenje požara poput raspršivača, vatrogasnih aparata i protupožarnih zidova. Osim toga, obuhvaćaju i obuku osoblja za postupanje u slučaju požara i evakuaciju. Primjena nacionalnih ili međunarodnih standarda, poput onih koje propisuju Međunarodna organizacija za civilnu avijaciju (*International Civil Aviation Organization* - ICAO) ili Međunarodna pomorska organizacija (*International Maritime Organization* - IMO), osigurava ujednačenu primjenu propisa u luci.

Drugo, sigurnost plovidbe osigurava siguran prolazak brodova kroz lučke vode i sprječava nesreće. Propisi za sigurnost plovidbe uključuju regulacije vezane uz sigurnu navigaciju brodova, označavanje plovnih putova, nadzor brzine brodova i postavljanje signala za upozorenje. Međunarodna pomorska organizacija postavlja globalne standarde za sigurnost plovidbe kroz konvencije poput Međunarodne konvencije o zaštiti života na moru (*International Convention for the Safety of Life at Sea SOLAS*) i Međunarodne konvencije o sprječavanju onečišćenja s brodova (*The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships - MARPOL*) [41, 42].

Treće, zaštita okoliša važan je aspekt sigurnosti u luci. Propisi o zaštiti okoliša propisuju mjere za sprječavanje onečišćenja zraka, vode i tla u luci. To uključuje pravilno postupanje s otpadom, ograničavanje emisija ispušnih plinova brodova i terminala, te zaštitu obalnih ekosustava. Ovi propisi često su usklađeni s nacionalnim zakonima o zaštiti okoliša i međunarodnim konvencijama poput Konvencije o zaštiti morskog okoliša sjeveroistočnog

Atlantika (*Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic* - OSPAR-a).

Četvrto, ograničenje pristupa ključno je za sprječavanje neovlaštenog ulaska u osjetljiva područja luke. Sigurnosni standardi u luci uključuju kontrole pristupa radi zaštite terminala za opasne materijale ili područja s visokim sigurnosnim rizikom. Nacionalni zakoni o sigurnosti i zaštiti od terorizma obično propisuju postupke i protokole za kontrolu pristupa osjetljivim područjima luke [42].

Peto, protuterorizam je važan aspekt sigurnosti u luci, a propisi i standardi uključuju mjere za sprječavanje terorističkih napada. Ovi propisi obično su dio nacionalnih sigurnosnih strategija i zakona o borbi protiv terorizma, koji propisuju nadzor tereta, pregleda vozila i putnika, te upotrebu tehnologije za otkrivanje eksploziva i opasnih tvari.

Šesto, obuka osoblja ključna je za osiguranje sigurnosti u luci. Zakoni o radu obično propisuju obvezu poslodavaca da osiguraju obuku osoblja o sigurnosnim postupcima i postupanju u hitnim situacijama. Osim toga, nacionalni standardi za obuku sigurnosti na radu mogu također propisivati specifične zahtjeve za obuku osoblja u luci [42, 43].

Ukupno, strogo pridržavanje sigurnosnih standarda i propisa ključno je za osiguranje sigurnog, pouzdanog i održivog funkcioniranja luka te zaštite ljudi, imovine i okoliša.

#### **4. PROJEKTIRANJA I PLANIRANJA LUČKE INFRASTRUKTURE ZA BRODOVE NA VODIK**

Razvoj tehnologije vodika kao alternativnog goriva za brodove predstavlja ključni korak prema smanjenju emisija stakleničkih plinova i ostvarivanju održivije pomorske industrije. Kako se svjetska zajednica sve više okreće prema energetske izvorima koji su manje štetni za okoliš, integracija brodova na vodik u globalni pomorski transport postaje sve značajnija.

U skladu s tim, projektiranje i planiranje lučke infrastrukture za brodove koji koriste vodik kao gorivo postaje ključni segment strategije prilagodbe luka novim zahtjevima i tehnologijama. Ovaj proces zahtijeva detaljnu analizu i planiranje kako bi se osigurala učinkovita operacija, sigurnost i minimalni utjecaj na okoliš [44].

U nastavku poglavlja istražit će se ključne aspekte projektiranja i planiranja lučke infrastrukture za brodove na vodik, uključujući geografsku analizu lokacija za prihvatni terminal, projektiranje operativnih postrojenja poput plutajućih platformi, skladišta i pumpi te planiranje energetske sustava za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vodika. Kroz sve ove segmente, naglasak će biti na ostvarivanju sigurne, pouzdane i održive lučke infrastrukture koja podržava prelazak na čišću i energetski učinkovitiju budućnost pomorskog transporta.

#### **4.1. GEOGRAFSKA ANALIZA LOKACIJA ZA PRIHVATNI TERMINAL**

Geografska analiza lokacija za prihvatni terminal brodova na vodik zahtijeva temeljito razmatranje niza faktora kako bi se osigurala optimalna lokacija koja će podržati sigurnu i učinkovitu operaciju terminala, uz minimalan utjecaj na okoliš i lokalnu zajednicu.

Jedan od ključnih faktora je blizina proizvodnih izvora vodika. Lokacija terminala trebala bi biti u neposrednoj blizini proizvodnih postrojenja kako bi se smanjili troškovi transporta vodika do terminala i osigurala kontinuirana opskrba. Ovo je ključno za održavanje stabilne i pouzdane opskrbe vodikom, što je presudno za neometan rad brodova na vodik.

Pristupnost lokacije također je važan faktor. Terminal treba biti lako dostupan putem cesta, željeznice i morskih puteva kako bi se olakšao transport vodika do terminala i pristup brodova. Dobri prometni pravci su ključni za optimizaciju logističkih lanaca i smanjenje troškova transporta [45].

Dubina vode također je bitna značajka koja se mora uzeti u obzir. Za veće brodove potrebna je odgovarajuća dubina vode kako bi se omogućio siguran pristup i vez brodova. Stoga je važno odabrati lokaciju s dovoljnom dubinom vode, uzimajući u obzir potrebe različitih veličina i tipova brodova koji će koristiti terminal. Uzimajući u obzir okolišne čimbenike, važno je provesti procjenu utjecaja na okoliš i lokalnu zajednicu. Lokacija terminala ne bi trebala ugroziti osjetljiva ekosustava, riblje populacije ili područja s visokom biološkom raznolikošću. Također, potrebno je osigurati da terminal zadovoljava regulatorne zahtjeve i standarde za zaštitu okoliša i sigurnost kako bi se minimizirali negativni utjecaji na okoliš i lokalnu zajednicu [45].

U konačnici, odabir lokacije za prihvatni terminal brodova na vodik zahtijeva uravnotežen pristup koji uzima u obzir sve navedene faktore kako bi se osigurala optimalna lokacija koja će podržati siguran, ekološki prihvatljiv i učinkovit rad terminala.

## **4.2. PROJEKTIRANJE OPERATIVNIH POSTROJENJA**

Projektiranje operativnih postrojenja za brodove na vodik zahtijeva detaljan pristup kako bi se osigurala optimalna funkcionalnost i sigurnost tijekom cijelog procesa rukovanja vodikom. Ovdje su ključni aspekti koji se trebaju uzeti u obzir [46]:

- **Plutajuće platforme:**

Plutajuće platforme moraju biti konstruirane tako da mogu pouzdano i sigurno prihvatiti brodove različitih veličina i tipova. Stabilnost platformi ključna je za siguran prihvat i vez brodova, a također treba osigurati dovoljan prostor za manevriranje brodova i sigurno privezivanje. Osim toga, platforme trebaju biti opremljene sigurnosnim sustavima poput zaštitnih ograda, osvjetljenja i sustava za gašenje požara.

- **Skladišta za pohranu vodika:**

Skladišta za pohranu vodika moraju biti dizajnirana s naglaskom na sigurnost i zaštitu od požara. Materijali i konstrukcija skladišta trebaju biti otporni na koroziju i visoke temperature, a prostor treba biti dovoljno prozračan i dobro ventiliran kako bi se smanjila opasnost od akumulacije vodika. Također, skladišta moraju imati sustave za detekciju i gašenje požara te sustave za odvodnju i neutralizaciju curenja vodika.

- **Pumpe za punjenje i istakanje:**

Pumpe za punjenje i istakanje vodika trebaju biti visokoučinkovite, pouzdane i sigurne za upotrebu. One trebaju omogućiti brzo punjenje brodova s vodikom, uz minimalan gubitak energije i minimalnu emisiju plinova. Pumpe također trebaju biti opremljene sustavima za sigurnosno gašenje i regulaciju tlaka kako bi se spriječile nepredviđene situacije i osigurala sigurna operacija.

- **Infrastruktura za nadzor i kontrolu:**

Operativna postrojenja trebaju biti opremljena infrastrukturom za nadzor i kontrolu svih procesa, uključujući sustave za praćenje razine vodika, temperaturu i tlak, kao i sustave za nadzor sigurnosnih parametara i detekciju potencijalnih opasnosti. Ovi sustavi trebaju omogućiti brzu reakciju na bilo kakve nepravilnosti ili hitne situacije te pružiti operaterima potrebne informacije za sigurno upravljanje postrojenjem.

- **Integracija s drugim energetskeim sustavima:**

Kako bi se osigurala održivost i učinkovitost, operativna postrojenja trebaju biti sposobna integrirati se s drugim energetskeim sustavima, poput obnovljivih izvora energije. To može uključivati korištenje solarnih panela za napajanje električnih sustava ili korištenje energije vjetra za pogon pumpi i ostale opreme. Ova integracija omogućava smanjenje emisija stakleničkih plinova i smanjenje ekološkog utjecaja operativnih postrojenja.

Kroz sve ove elemente, projektiranje operativnih postrojenja za brodove na vodik zahtijeva holistički pristup koji kombinira sigurnost, učinkovitost i održivost kako bi se osigurala pouzdana i sigurna operacija lučke infrastrukture.

### **4.3. PLANIRANJE ENERGETSKIH SUSTAVA ZA PROIZVODNJU, SKLADIŠTENJE I DISTRIBUCIJU VODIKA**

Razvijanje energetskeih sustava za stvaranje, zadržavanje i transport vodika ključno je za jamčenje stalnog protoka ovog vitalnog izvora energije za brodove koje pokreće vodik. Sveobuhvatna strategija u organizaciji ovih sustava neophodna je kako bi se zajamčio nesmetan rad, isplativost i minimalne posljedice na okoliš. Ova strategija obuhvaća tri osnovne komponente: proizvodnju vodika, skladištenje vodika i distribuciju vodika [47].

*Proizvodnja vodika* predstavlja ključnu ulogu u lancu opskrbe energijom za brodove na vodikov pogon. Za proizvodnju vodika koriste se različite metode, poput elektrolize vode, reformiranja prirodnog plina i biološke proizvodnje. Elektroliza vode, koja uključuje razdvajanje vode na vodik i kisik pomoću električne energije, postaje sve popularnija zbog svoje čistoće i održivosti, posebno kada se napaja iz obnovljivih izvora poput sunčeve energije ili energije vjetra. Ova metoda je ekološki prihvatljiva jer ne proizvodi emisije

stakleničkih plinova pri korištenju čiste električne energije. Reforming prirodnog plina, s druge strane, uključuje reakciju metana s parom na visokim temperaturama kako bi se proizveli vodik i ugljični dioksid. Iako je ovo najčešća metoda za industrijsku proizvodnju vodika, ona ima značajan utjecaj na okoliš zbog emisija CO<sub>2</sub>, što potiče potrebu za tehnologijom za hvatanje i skladištenje ugljika. Biološka proizvodnja koristi mikroorganizme za stvaranje vodika kroz procese poput fermentacije biomase ili fotobiološke razgradnje. Iako su ove tehnologije još uvijek u razvoju, obećavaju održivu proizvodnju vodika iz obnovljivih izvora. Odabir najprikladnije tehnologije za proizvodnju vodika ovisi o čimbenicima kao što su dostupnost sirovina, energetska učinkovitost, razine emisija te ekonomski i ekološki aspekti. Na primjer, regije koje obiluju obnovljivom energijom mogu favorizirati elektrolizu, dok se one s pristupom pristupačnom prirodnom plinu mogu odlučiti za reformu s mjerama za smanjenje emisija [47].

*Skladištenje vodika* ključno je za održavanje stalne opskrbe vodikom, posebno zbog njegove niske gustoće i visoke zapaljivosti. Dostupni su različiti načini skladištenja, od kojih svaki ima svoje prednosti i nedostatke. Tekući vodik pohranjuje se na ekstremno niskim temperaturama, što omogućuje skladištenje velike količine vodika u malom prostoru, ali zahtijeva skupu kriogenu opremu. Komprimirani vodik pohranjuje se kao plin pod visokim tlakom, što je najčešće korištena metoda zbog svoje jednostavnosti i nižih troškova, iako ima ograničenja u kapacitetu skladištenja. Metalni hidridi nude način pohranjivanja vodika na nižim tlakovima i temperaturama tako što ga povezuju s određenim metalima, ali su teži i skuplji. Odabir tehnologije skladištenja trebao bi se temeljiti na specifičnim zahtjevima operacije, dajući prednost sigurnosti, pouzdanosti i smanjenju gubitka vodika. Na primjer, komprimirani vodik bi mogao biti prikladniji za mobilne aplikacije poput brodova zbog jednostavnije opreme, dok bi kriogeno skladištenje moglo biti preferirano za velike kopnene sustave skladištenja zbog svoje veće gustoće energije [48].

Uspostava infrastrukture za *distribuciju vodika* zahtijeva stvaranje sustava koji omogućava transport vodika do određenih terminala i konačno do brodova. Ovaj sustav sastoji se od različitih bitnih elemenata: cjevovoda, objekata za punjenje i isporuku vodika te logističkih mehanizama. Iako se cjevovodi smatraju najučinkovitijim sredstvom za prijenos velikih količina vodika na velike udaljenosti, oni zahtijevaju specijaliziranu opremu i materijale zbog reaktivnosti vodika s mnogim metalima. Terminali za punjenje i isporuku moraju biti opremljeni za sigurno rukovanje vodikom, uključujući procese punjenja brodskih spremnika, skladištenja i prekrcaja. Provedba sigurnosnih mjera, kao što su uređaji za otkrivanje curenja



vodika i sustavi za sprječavanje požara, od ključne je važnosti. Logistički sustavi uključuju korištenje tankera, kamiona i brodova za prijevoz vodika, što zahtijeva koordinaciju kako bi se osigurala učinkovita i brza isporuka vodika. Uz fizičku infrastrukturu, nužno je uspostaviti administrativne i regulatorne okvire koji promiču siguran i učinkovit transport vodika. To uključuje standardizaciju opreme i postupaka, obuku osoblja i poštivanje međunarodnih normi i propisa [48].

Kako bi se učinkovito planirali energetske sustavi za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vodika za vodikove brodove, mora se uzeti u obzir holistički pristup. Ovaj pristup treba obuhvatiti tehničke, ekonomske, sigurnosne i okolišne čimbenike. Ova sveobuhvatna strategija uključuje analizu potreba i raspoloživih resursa, projektiranje tehničkih rješenja, provođenje ekonomskih i ekoloških procjena te uspostavljanje regulatornog okvira. Procjena potreba i resursa uključuje određivanje potrebne količine vodika, identificiranje proizvodnih resursa i istraživanje mogućnosti skladištenja i distribucije. Tehnički dizajn usmjeren je na razvoj učinkovitih i sigurnih rješenja za cijeli sustav, uključujući odabir odgovarajućih tehnologija. Ekonomska analiza uključuje procjenu troškova izgradnje, rada i održavanja, kao i određivanje ekonomske isplativosti različitih tehnologija. Analiza okoliša procjenjuje utjecaj na okoliš, kao što su emisije stakleničkih plinova, potrošnja resursa, s ciljem minimiziranja negativnih učinaka i promicanja održivosti. Regulatorni okvir uključuje stvaranje i provedbu zakona i propisa za podršku sigurnosti, učinkovitosti i održivosti vodikovih energetskih sustava [48].

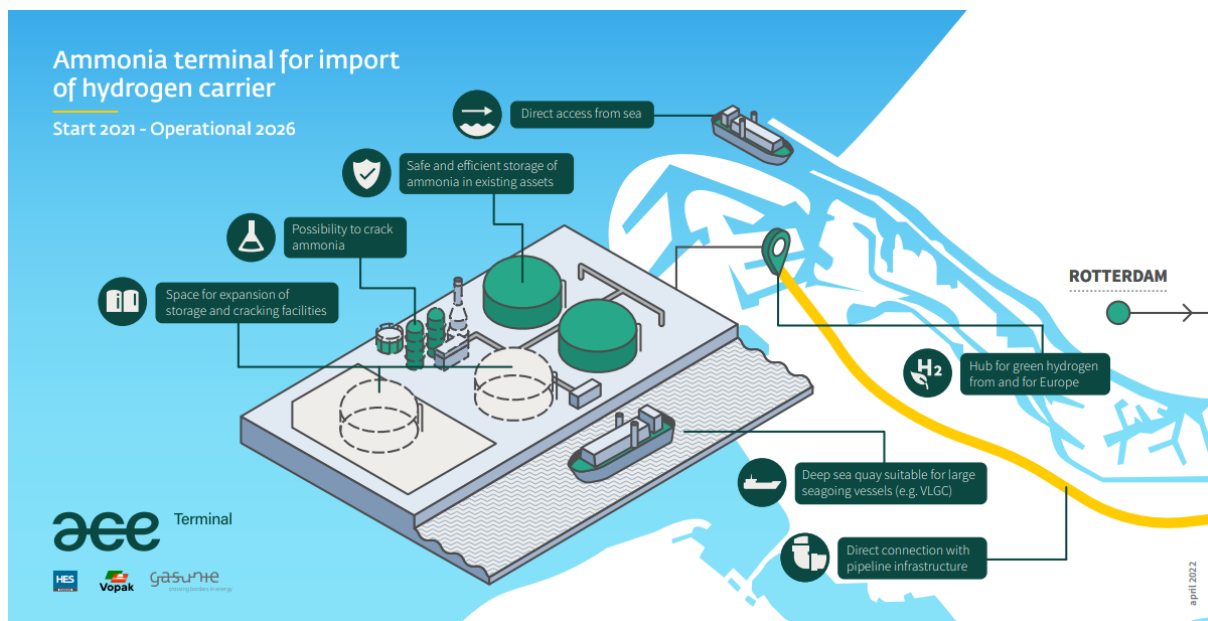
Ključno je strogo slijediti navedena načela kako bi se zajamčila dosljedna i dugotrajna opskrba vodikom, kao i olakšao prelazak na zelenije izvore energije u pomorskoj industriji. Uzimanjem sveobuhvatnog i jedinstvenog pristupa, možemo stvoriti energetske sustave koji zadovoljavaju zahtjeve modernih brodova na vodikov pogon, a sve dok minimiziraju njihov utjecaj na okoliš i potiču održivi napredak.

## **5. STUDIJA SLUČAJA: PROJEKTIRANJE PRIHVATNOG TERMINALA ZA BRODOVE NA VODIK NA PRIMJERU ROTTERDAMU HYDROGEN HOLLAND 1**

U ovom poglavlju detaljno je opisan projekt izgradnje prihvatnog terminala za brodove na vodik u luci Rotterdam. Ovaj projekt nazvan je „Hydrogen Holland 1“ te postavlja temelj za detaljnu analizu planiranja, dizajna i implementacije prihvatnog terminala za brodove na vodik. Projekt je započeo u rujnu 2022. godine, a njegov završetak se planira u 2025. godini.

### **5.1. OPIS PODRUČJA**

Projekt Holland Hydrogen 1 predstavlja revolucionarnu inicijativu koja će transformirati energetska pejzaž Rotterdama i pružiti značajan doprinos prelasku na održivu energiju. Ovo 200-megavatno postrojenje za proizvodnju obnovljivog vodika imaće ključnu ulogu u smanjenju emisija stakleničkih plinova i prelasku na čistu energiju u luci Rotterdam i šire (Slika 5).



**Slika 5. Prikaz područja projekta Hydrogen Holland 1 u Rotterdamu**

Izvor: <https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2022-04/infographic-gasunie-vopak-hes.pdf>  
(01.04.2024).

Prvenstveno namijenjen zamjeni sivog vodika kao sirovine u Shell Chemicals and Energy Park Rotterdam, Holland Hydrogen 1 će biti pokretačka snaga za smanjenje emisija i unapređenje održivosti u ovom ključnom industrijskom području. Proizvodnja 60 tona obnovljivog vodika dnevno značajno će doprinijeti ciljevima smanjenja emisija CO<sub>2</sub>, s procijenjenim smanjenjem od 2,4 megatona CO<sub>2</sub> u prvoj desetljeću operacija [49].

Lokacija postrojenja, smještena tik iza plaže Tweede Maasvlakte, pruža idealne uvjete za njegovu operaciju (Slika 5). Uz pristup postojećoj infrastrukturi i logističkim mogućnostima luke Rotterdam, postrojenje će biti povezano s nacionalnom mrežom za vodik, omogućavajući distribuciju vodika u cijeloj sjeverozapadnoj Europi.

Holland Hydrogen 1 koristi čistu energiju iz priobalne vjetroelektrane Hollandse Kust Noord, a demineraliziranu vodu dobiva iz površinskih voda jezera Briel. Transport vodika obavlja se putem nove visokokapacitetne cjevovodne infrastrukture kroz luku Rotterdam i do Shellovog energetskeg parka i kemijskog parka u Pernisu.

Ovaj projekt nije samo tehnički podvig, već i predanost ostvarenju ciljeva održivog razvoja Ujedinjenih naroda. Omogućujući pristupačnu i čistu energiju, inovirajući prema održivoj

industriji i infrastrukturi te poduzimajući proaktivne mjere prema klimatskoj akciji, Holland Hydrogen 1 igra ključnu ulogu u ostvarenju globalnih ciljeva održivosti [49, 50].

U suradnji s vodećim inženjerskim tvrtkama poput Worley Engineering i arhitektonskim stručnjacima poput Kraaijvanger Architects, projekt Holland Hydrogen 1 postavlja nove standarde u dizajnu i inženjeringu infrastrukture za obnovljive izvore energije. Korištenjem netoksičnih i reciklabilnih materijala te planiranom upotrebom bio-baziranih materijala u okolnom krajoliku, projekt postavlja temelje za održivu budućnost.

## **5.2. ANALIZA ZAHTJEVA I SPECIFIKACIJA**

Analiza zahtjeva i specifikacija za projekt Holland Hydrogen 1 predstavlja ključni korak u planiranju i dizajniranju ovog revolucionarnog postrojenja za proizvodnju obnovljivog vodika. Ova analiza temelji se na detaljnom proučavanju zahtjeva projekta, uključujući tehničke, operativne, okolišne i regulatorne aspekte, kako bi se osiguralo da postrojenje bude usklađeno s ciljevima projekta i zahtjevima relevantnih dionika.

Tehnički zahtjevi projekta uključuju potrebnu snagu proizvodnje vodika od 200 megavata, što će omogućiti proizvodnju 60 tona obnovljivog vodika dnevno [50]. Ovi zahtjevi podrazumijevaju pažljivo planiranje i dimenzioniranje elektrolizera, skladišta, distribucijske infrastrukture i drugih operativnih postrojenja kako bi se osigurala pouzdana i učinkovita operacija postrojenja [50,51].

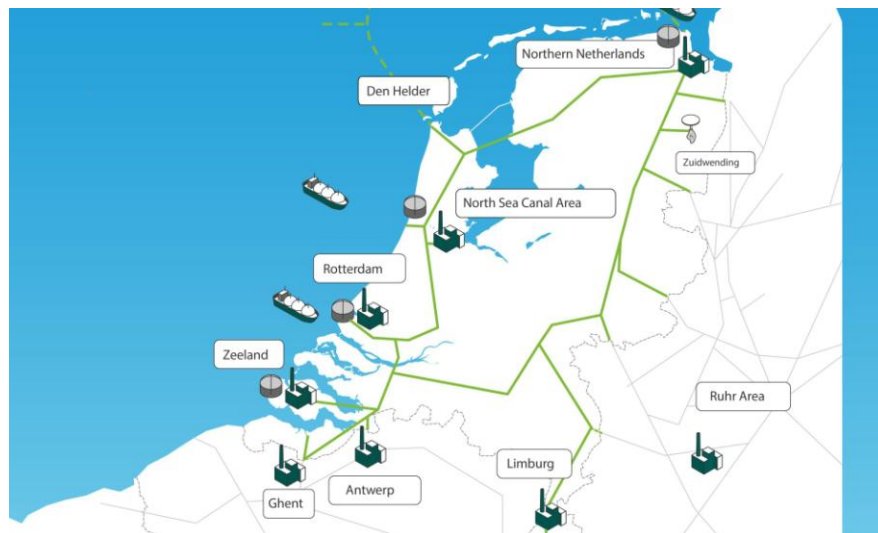
Operativni zahtjevi uključuju prilagodbu proizvodnje vodika potrebama Shell Chemicals and Energy Park Rotterdam u Pernisu, kao i buduću mogućnost isporuke vodika teškim teretnim vozilima. Također se razmatraju zahtjevi za snabdijevanje energijom i vodom, kao i logistički zahtjevi za transport i skladištenje vodika unutar luke Rotterdam.

Okolišni zahtjevi projekta uključuju procjenu utjecaja na okoliš i lokalnu zajednicu te osiguranje usklađenosti s regulatornim standardima zaštite okoliša. Ovo uključuje pravilno upravljanje otpadom, zaštitu vodnih resursa i stvaranje održivog krajolika oko postrojenja. Regulatorni zahtjevi obuhvaćaju usklađenost s nacionalnim i međunarodnim propisima i standardima za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vodika, kao i provođenje sigurnosnih i zaštitnih mjera kako bi se osigurala sigurna operacija postrojenja i zaštita zaposlenika i okoliša [51].

Ukupno, analiza zahtjeva i specifikacija za projekt Holland Hydrogen 1 omogućuje cjelovit uvid u tehničke, operativne, okolišne i regulatorne aspekte projekta, pružajući temelj za uspješno planiranje, dizajniranje i implementaciju ovog ključnog postrojenja za proizvodnju obnovljivog vodika.

### 5.3. PLANIRANJE I PROJEKTIRANJE LUČKE INFRASTRUKTURE

Projekt Holland Hydrogen I (HH) označava korak prema zelenijoj i održivijoj budućnosti ne samo za Nizozemsku, već i za cijelu Europu. Ova impresivna inicijativa predstavlja integrirani sustav proizvodnje, distribucije i korištenja zelenog vodika na industrijskoj razini, postavljajući nove standarde u održivoj energetici (Slika 6) [52].



Slika 6. Prikaz projektne infrastrukture Holland HydroGEN I.

Izvor: [52].

Smješten u srcu luke Rotterdam, jednog od najvećih i najvažnijih luka u Europi, HH će biti ključni čimbenik u transformaciji energetske pejzaža regije. Elektrolizator snage 400 MW, koji će biti deset puta veći od bilo kojeg drugog elektrolizatora u Europi, omogućit će proizvodnju ogromnih količina zelenog vodika koristeći obnovljivu energiju iz priobalnih vjetroelektrana [52]. Prva faza projekta uključuje izgradnju elektrolizatora snage 200 MW, čime će se zamijeniti fosilni vodik u obližnjoj rafineriji. Ovo će rezultirati znatnim smanjenjem emisija CO<sub>2</sub> i postavljanjem temelja za daljnji razvoj obnovljivih izvora energije u regiji. Tijekom prvih deset godina rada, očekuje se 100% relativno smanjenje emisija CO<sub>2</sub>,

što predstavlja značajan doprinos globalnim naporima u borbi protiv klimatskih promjena [53].

Ključni dio projekta je i izgradnja hidrogenskog cjevovoda koji će omogućiti siguran i učinkovit transport zelenog vodika između HH-a, rafinerije i drugih korisnika u Rotterdamu. Ovaj infrastrukturni projekt predstavlja korak prema stvaranju održive vodikove ekonomije u regiji, s potencijalom da postane model za buduće projekte diljem Europe.

Nadalje, projekt Holland Hydrogen I postavlja standarde za održivost i cirkularnu ekonomiju. Korištenjem cirkularnih materijala i minimalno utječući na okoliš, HH demonstrira svoju predanost zaštiti prirode i očuvanju okoliša. Integrirani pristup proizvodnji, distribuciji i korištenju vodika na održivoj razini čini ovaj projekt jedinstvenim u svijetu i pokazuje put prema čistijoj i zelenijoj budućnosti [53, 54].

Kroz HH, Nizozemska postavlja temelje za novu eru u energetici, promičući inovacije, održivost i globalnu suradnju u borbi protiv klimatskih promjena. Ovaj projekt nije samo investicija u budućnost Nizozemske, već i snažna poruka svijetu da je održiva energija ključna za očuvanje planeta i stvaranje bolje budućnosti za sve nas.

#### **5.4. FINANCIJSKA PROCJENA I EKONOMSKA OPRAVDANOST**

Projekt Holland Hydrogen 1 predstavlja revolucionarnu inicijativu kompanije Shell u etabliranju proizvodnje, distribucije i upotrebe zelenog vodika na dosad neviđenim razinama. Ovaj projekt nije samo ambiciozan u svom obimu, već ima za cilj postaviti temelje za postupno povećanje kapaciteta elektrolizera i integraciju sustava do višestrukih gigavata. Njegova suština leži u podršci strategiji Europske unije za široku implementaciju vodika proizvedenog iz obnovljivih izvora energije, što se očekuje da će imati ključnu ulogu u dekarbonizaciji industrije, teškog teretnog prijevoza i grijanja u cijeloj Europi.

Unatoč izazovima, poput nedostatka elektrolizera takvih razmjera u Nizozemskoj, projekt Holland Hydrogen 1 stremi ka postizanju komercijalne održivosti proizvodnje zelenog vodika u takvim razmjerima, s očekivanim ostvarenjem tog cilja tek krajem 2020-ih godina. No, kako bi se to postiglo, trebat će prevladati dva ključna izazova: pristupačnost, koja zahtijeva smanjenje troškova kroz skaliranje u lancu opskrbe, te sinkroniziran razvoj ponude i potražnje, što zahtijeva koordinaciju i suradnju duž cijelog lanca vrijednosti [54, 55].

Financijska procjena projekta pokazuje značajna ulaganja, s ukupnom investicijom od 684,2 milijuna eura, od čega je samo 458,2 milijuna eura prihvatljivo kao trošak. Shell će uložiti u različite alate i opremu kako bi osigurao uspješnu realizaciju projekta. Nadalje, projekt Holland Hydrogen 1 i budući integrirani projekti elektrolizera bit će ključni za razvoj priobalnih vjetroelektrana, pružajući fleksibilnog korisnika električne energije u sve nestabilnijem energetsom sustavu. Ovaj projekt bit će ključan u ostvarivanju ambicioznih ciljeva REPowerEU-a, uključujući postizanje udjela od 45% obnovljive energije do 2030. godine i proizvodnju 10 milijuna tona obnovljivog vodika godišnje u EU [55].

Dizajn lokacije Holland Hydrogen 1 osmišljen je da bude vizualno atraktivan, ističući inovaciju kroz prekrasnu arhitekturu kako bi potaknuo posjete i edukaciju o vodiku, te kako tehnologija i priroda mogu koegzistirati u harmoniji. Osim toga, projekt će služiti kao katalizator za investicije i daljnji razvoj u luci Rotterdam, dok će Shell maksimizirati lokalne ugovore kako bi zadržao investicije i vještine u Nizozemskoj i EU. Ovaj projekt će biti ključan korak u otključavanju potencijala elektrolize na gigavatskoj razini, otvarajući put ka izgradnji ključne stručnosti u području tehnologija vodika i stvaranju 17 000 radnih mjesta u sektoru zelenog vodika u Nizozemskoj do 2030. godine [55].

## **6. EKOLOŠKI ASPEKTI I ODRŽIVOST LUČKE INFRASTRUKTURE ZA BRODOVE NA VODIK**

Razvoj lučke infrastrukture za brodove koji koriste vodik kao pogonsko gorivo predstavlja ključan korak u ostvarivanju ciljeva održivosti u pomorskom sektoru. Dok se svjetska zajednica sve više okreće prema alternativnim izvorima energije radi smanjenja emisija stakleničkih plinova i borbe protiv klimatskih promjena, integracija vodika kao čistog goriva u lučke operacije postaje sve važnija. Ovaj razvoj otvara mogućnosti za značajno smanjenje emisija štetnih plinova, poboljšanje kvalitete zraka i smanjenje ekološkog utjecaja pomorskog prometa.

U ovom kontekstu, ekološki aspekti i održivost lučke infrastrukture za brodove na vodik postaju sve važniji i potrebno je pažljivo razmotriti kako bi se osiguralo da razvoj ove infrastrukture bude u skladu s najvišim ekološkim standardima. Ovaj tekst istražiti će ključne aspekte ekološke održivosti lučke infrastrukture za brodove na vodik, uključujući utjecaj na okoliš, mogućnosti za smanjenje emisija i integraciju obnovljivih izvora energije, kao i druge faktore koji doprinose održivosti ovih sustava.

### **6.1. PROCJENA UTJECAJA LUČKE INFRASTRUKTURE NA OKOLIŠ, UKLJUČUJUĆI EMISIJE I UPRAVLJANJE OTPADOM**

Kada je riječ o procjeni utjecaja lučke infrastrukture za brodove na vodik na okoliš, ključno je sveobuhvatno razmotriti emisije stakleničkih plinova kao jedan od ključnih elemenata. Analiza emisija CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> tijekom svake faze procesa, od proizvodnje do korištenja vodika, ključna je za razumijevanje ukupnog ekološkog otiska.

Na razinu emisije CO<sub>2</sub> uvelike utječe vrsta izvora energije koji se koriste u proizvodnji i distribuciji vodika. Kada se za proizvodnju električne energije koriste fosilna goriva, to može



rezultirati povišenim razinama emisije CO<sub>2</sub>. Međutim, ako se koristi obnovljiva energija poput energije vjetra ili sunca, emisije CO<sub>2</sub> mogu biti značajno smanjene ili čak eliminirane. Važno je pažljivo analizirati izvore energije kako bi se osiguralo da se koriste ekološki održivi izvori [56].

Emisije NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub>, koje su povezane s sagorijevanjem fosilnih goriva, također su važan aspekt za razmatranje. Ove emisije mogu biti prisutne tijekom transporta i korištenja vodika, posebno ako se koriste fosilna goriva u procesima kao što su transport ili skladištenje. Potrebno je primijeniti mjere za smanjenje emisija oksida dušika i sumpora kako bi se minimizirao njihov utjecaj na okoliš.

Osim toga, važno je razmotriti i indirektne emisije koje proizlaze iz potrebnih energijskih ulaganja u sam proces proizvodnje i distribucije vodika. To uključuje energiju potrebnu za elektrolizu vode ili transport vodika. Integrirana analiza ovih emisija omogućuje cjelovit uvid u ukupni ekološki otisak lučke infrastrukture za brodove na vodik i omogućuje identifikaciju područja za poboljšanje i implementaciju ekološki održivih praksi.

Upravljanje otpadom također zahtijeva duboku analizu. Procesi proizvodnje vodika često rezultiraju stvaranjem nusproizvoda ili otpada, uključujući kemikalije, toksične tvari ili neiskorištene materijale. Važno je osigurati da se ovi nusproizvodi ili otpad sigurno i odgovorno uklanjaju kako bi se spriječilo onečišćenje okoliša i negativni utjecaj na lokalni ekosustav. To može uključivati primjenu naprednih tehnologija za recikliranje ili ponovnu uporabu nusproizvoda, kao i implementaciju stroge regulative i standarda koji reguliraju sigurno zbrinjavanje otpada. Upravljanje otpadom je ključan dio održivosti lučke infrastrukture za brodove na vodik i zahtijeva duboku analizu kako bi se osiguralo odgovorno postupanje s nusproizvodima ili otpadom koji nastaje tijekom procesa proizvodnje vodika [57].

Procesi proizvodnje vodika često rezultiraju stvaranjem različitih nusproizvoda ili otpada, uključujući kemikalije, toksične tvari ili neiskorištene materijale. Važno je osigurati da se ovi nusproizvodi ili otpad sigurno i odgovorno uklanjaju kako bi se spriječilo onečišćenje okoliša i negativni utjecaj na lokalni ekosustav.

Jedan od načina za upravljanje ovim otpadom je implementacija naprednih tehnologija za recikliranje ili ponovnu uporabu nusproizvoda. Recikliranje omogućuje ponovnu uporabu materijala ili resursa kako bi se smanjila potrošnja i minimizirao otpad koji se odlaže na

odlagališta. Također, razvoj tehnologija za sigurno i učinkovito zbrinjavanje toksičnih tvari ili opasnog otpada ključan je za očuvanje okoliša i ljudskog zdravlja [57].

Pored primjene tehnoloških rješenja, važno je također uspostaviti stroge regulative i standarde koji reguliraju sigurno zbrinjavanje otpada. Ovi propisi trebaju osigurati da se svi nusproizvodi ili otpad tretiraju na odgovarajući način kako bi se minimizirali negativni utjecaji na okoliš i zajednicu. Redovita revizija i nadzor nad provedbom tih propisa ključni su za osiguravanje usklađenosti i održavanje visokih standarda u upravljanju otpadom.

## **6.2. IMPLEMENTACIJA MJERA ZA SMANJENJE EKOLOŠKOG OTISKA TERMINALA ZA BRODOVE NA VODIK**

Upravljanje ekološkim otiskom terminala za brodove na vodik zahtijeva duboku analizu i sveobuhvatan pristup. Evo detaljnijeg pregleda mjera koje se mogu provesti kako bi se smanjio negativni utjecaj na okoliš [58, 59]:

- **Napredne tehnologije za smanjenje emisija:**

Implementacija naprednih tehnologija za pročišćavanje zraka i vode može značajno smanjiti emisije štetnih tvari u okoliš. Osim toga, istraživanje i razvoj inovativnih tehnologija za smanjenje emisija CO<sub>2</sub> tijekom proizvodnje vodika mogu biti ključni u postizanju dugoročnih ciljeva održivosti.

- **Održiva energija:**

Prijelaz na obnovljive izvore energije poput solarnih panela, vjetroelektrana ili hidroelektrana za napajanje terminala može značajno smanjiti emisije stakleničkih plinova i smanjiti ekološki otisak. Uz to, implementacija energetske učinkovitosti i korištenje pametnih mreža mogu optimizirati potrošnju energije.

- **Programi recikliranja i održivo upravljanje otpadom:**

Razvoj programa recikliranja i održivog upravljanja otpadom može smanjiti količinu otpada koja završava na odlagalištima i smanjiti potrebu za resursima. Recikliranje nusproizvoda i otpada može se koristiti kao sirovina u drugim industrijama, smanjujući potrebu za ekstrakcijom novih resursa.

- **Monitoring i upravljanje ekološkim parametrima:**

Redoviti monitoring kvalitete zraka, vode i tla oko terminala može osigurati brzo otkrivanje potencijalnih onečišćivača i pružiti osnovu za poduzimanje preventivnih

mjera. Osim toga, uspostava sustava za praćenje emisija i potrošnje resursa može pružiti podatke potrebne za kontinuirano poboljšanje učinkovitosti i smanjenje ekološkog otiska.

- **Edukacija i angažman zajednice:**

Edukacija i angažman lokalne zajednice o važnosti očuvanja okoliša i održivosti terminala mogu potaknuti podršku i suradnju. Organiziranje edukativnih programa, radionica i događanja može povećati svijest i potaknuti pozitivne promjene u ponašanju.

- **Održavanje bioraznolikost i zaštita okoliša:**

Implementacija programa za očuvanje bioraznolikost u okolini terminala može pridonijeti zaštiti lokalnog ekosustava i osigurati ravnotežu u prirodnom okolišu. To može uključivati očuvanje prirodnih staništa, sadnju autohtonih biljnih vrsta i provođenje inicijativa za zaštitu ugroženih vrsta.

- **Korištenje održivih materijala i tehnologija:**

Odabir održivih materijala za izgradnju infrastrukture terminala i korištenje ekološki prihvatljivih tehnologija može smanjiti negativan utjecaj na okoliš. Ovo uključuje upotrebu materijala s niskim ugljičnim otiskom, kao i primjenu inovativnih tehnologija koje minimiziraju negativne ekološke posljedice.

Sveobuhvatan pristup koji uključuje ove mjere može osigurati da terminal za brodove na vodik bude ekološki prihvatljiv i održiv, dok istovremeno podržava tranziciju prema čišćoj i obnovljivoj energetici.

### **6.3. PROMOCIJA ODRŽIVIH PRAKSI I TEHNOLOGIJA U RAZVOJU LUČKE INFRASTRUKTURE**

Razvijanje održivih praksi i tehnologija u lučkoj infrastrukturi za brodove na vodik zahtijeva sveobuhvatan pristup koji nadilazi samo tehničke aspekte. Potrebno je dublje uključivanje sudionika, istraživanje novih inovacija i osiguranje da se projekti provode u skladu s najvišim standardima održivosti [60].

- **Edukacija i osvještavanje:**

Programi edukacije trebaju se usmjeriti na sve dionike, uključujući operatore luka, lokalne zajednice, vlasti i tvrtke. Ovi programi ne samo da bi trebali informirati o

ekološkim aspektima projekta, već bi također trebali potaknuti promjene u ponašanju i stavovima prema održivosti.

- **Poticanje istraživanja i razvoja:**

Potrebno je poticati istraživanje novih tehnologija koje mogu poboljšati ekološke performanse lučke infrastrukture. To uključuje invencije poput naprednih sustava pročišćavanja otpadnih voda, inovativnih metoda recikliranja materijala i tehnologija za smanjenje emisija.

- **Suradnja s lokalnim zajednicama:**

Kako bi se osiguralo prihvaćanje projekata i minimalizirali negativni utjecaji na lokalnu okolinu, važno je surađivati s lokalnim zajednicama tijekom cijelog procesa planiranja i implementacije. Ovo uključuje aktivno slušanje njihovih zabrinutosti, pružanje transparentnih informacija i uključivanje njihovih prijedloga u planiranje.

- **Postavljanje visokih standarda održivosti:**

Projekti lučke infrastrukture trebaju biti usklađeni s najvišim ekološkim standardima. To uključuje primjenu stroge regulative, praćenje ekoloških performansi tijekom operacija i kontinuirano poboljšanje kroz inovacije i prilagodbe.

- **Praćenje i izvješćivanje:**

Redovito praćenje ekoloških pokazatelja i izvješćivanje o njima ključno je za osiguravanje da projekti održive infrastrukture za brodove na vodik ostvaruju svoje ciljeve. Ova transparentnost pomaže u izgradnji povjerenja dionika i promoviranju održivosti kao temeljnog principa u svim aspektima rada [60].

Uvođenje ovih opširnijih mjera osigurava da lučka infrastruktura za brodove na vodik ne samo da djeluje u skladu s održivim načelima, već također igra aktivnu ulogu u promicanju održivosti u široj zajednici.



## 7. ZAKLJUČAK

Proces planiranja i projektiranja lučke infrastrukture za prihvat brodova na vodikov pogon višestruk je pothvat koji zahtijeva temeljitu analizu, usklađivanje različitih čimbenika i stalnu suradnju između različitih dionika. Tijekom ovog zamršenog procesa mora se uzeti u obzir nekoliko ključnih komponenti kako bi se zajamčio učinkovit rad i dugovječnost lučke infrastrukture.

Pri procjeni održivosti ugradnje brodova na vodik u lučke operacije, ključno je uzeti u obzir niz tehničkih čimbenika i specifikacija. Oni mogu varirati od veličine i rasporeda lukobrana do dubine pristaništa, kao i potrebne infrastrukture za skladištenje i rukovanje vodikovim gorivom. Osim toga, bitno je uspostaviti i pridržavati se strogih sigurnosnih mjera i protokola za zaštitu dobrobiti radnika, plovila i okolnog okoliša tijekom procesa ukrcaja i iskrcaja tereta. U planiranju i projektiranju lučke infrastrukture ključni su ekonomski aspekti. Ključno je provesti temeljitu financijsku procjenu koja uzima u obzir troškove povezane s izgradnjom, održavanjem i radom terminala za brodove na vodik. Dodatno, procjena potencijalnog prihoda iz različitih izvora kao što su naknade, troškovi energije i drugi operativni troškovi neophodna je kako bi se zajamčila financijska održivost pothvata.

Kako bi se riješili problemi okoliša, važno je procijeniti kako lučka infrastruktura utječe na okoliš. To uključuje ispitivanje emisija stakleničkih plinova, učinaka na kvalitetu zraka i vode te potencijalne štete lokalnom ekosustavu. Poduzimanje radnji za minimiziranje utjecaja na okoliš, kao što je korištenje sustava za pročišćavanje zraka i vode i provedba programa recikliranja otpada, ključno je za promicanje dugoročne održivosti lučkih operacija.

Kako bi se unaprijedile održive prakse i tehnologije, postoji kritična potreba za izdvajanjem resursa za obrazovanje i povećanje svijesti među dionicima o važnosti očuvanja okoliša. Nadalje, imperativ je podržati istraživanje i stvaranje inovativnih tehnologija koje mogu poboljšati ekološku održivost lučke infrastrukture, kao i surađivati s lokalnim zajednicama i vlastima kako bi se zajamčilo da su projekti usklađeni s najstrožim ekološkim propisima i da zadovoljavaju specifične potrebe okolnog okoliša.

Ispitivanjem Holland Hydrogena 1 postaje očito da je sveobuhvatan pristup koji uzima u obzir tehničke, ekonomske, okolišne i društvene čimbenike ključan. Ovaj projekt predstavlja primjer vrhunske tehnologije i služi kao mjerilo za održivost i ekološke prakse u pomorskom sektoru.

Studija slučaja Holland Hydrogen 1 naglašava ključnu ulogu suradnje među različitim dionicima, kao što su vladine agencije, lokalne zajednice, industrija i znanstvena zajednica. Ovaj holistički pristup ključan je za postizanje ciljeva održivosti i smanjenje emisija stakleničkih plinova u pomorskom sektoru. Predvođeni Holland Hydrogen 1, Shell ne samo da postavlja temelje za proizvodnju zelenog vodika, već također potiče inovacije novih tehnologija i održivih praksi u području pomorstva. Ova inicijativa obećava u značajnom doprinosu globalnim naporima za očuvanje okoliša i smanjenju emisija, dok također donosi ekonomske prednosti i promiče rast lokalnih zajednica.

Holland Hydrogen 1 služi kao sjajna ilustracija kako integracija održivosti, tehnološkog napretka i ekonomske izvedivosti može harmonično djelovati zajedno kako bi utrila put svjetlijoj budućnosti i za pomorski sektor i za okoliš u cjelini. Tvrtka je primjer potencijala za napredak i pozitivne promjene unutar industrije.

Unutar završnog rada predložena je hipoteza koja navodi da prilagodba lučke infrastrukture za vodik omogućava siguran i učinkovit prihvata brodova na vodikov pogon. Navedenu hipotezu podupire cjelokupno istraživanje provedeno na primjeru Rotterdam Hydrogen Holland 1. stoga se hipoteza prihvaća.

Široko podržana teorija naglašava važnost pažljivog planiranja i izgradnje lučke infrastrukture za prihvat brodova na vodikov pogon, s ciljem promicanja održivosti i financijske održivosti u korištenju vodika kao goriva u pomorskoj industriji. Ovo priznanje naglašava uvjerenje da strateško planiranje i projektiranje infrastrukture može uvelike koristiti ekološkim, ekonomskim i društvenim čimbenicima povezanim s usvajanjem vodika u pomorskim operacijama.

Kao netko tko proučava i prati trenutačni razvoj u pomorskom sektoru, uvjeren sam da je pomak prema korištenju vodika kao izvora goriva neizbježan ako se žele ispuniti zajednički ciljevi održivosti na globalnoj razini. Strateški razvoj lučkih objekata za prihvat plovila na vodikov pogon ne samo da igra ključnu ulogu u smanjenju emisija ugljičnog dioksida, već predstavlja i jedinstvenu priliku za poticanje inovacija i unapređenje tehnologije u pomorskoj industriji.

Zbog ovih razloga, smatram da je neophodno posvetiti resurse napretku inovativnih tehnologija, obrazovanju svih uključenih strana i suradnji s lokalnim zajednicama kako bi se postigla skladna ravnoteža između ekoloških, ekonomskih i društvenih briga. Inicijative kao što je Holland Hydrogen 1 ključne su za stvaranje puta za buduća nastojanja i postavljanje standarda za izvrsnost unutar polja.

## LITERATURA

1. Smith, J. (2020). Hydrogen-Powered Shipping: A Review of Current Technologies and Future Prospects. *International Journal of Maritime Engineering*, 45(2), 123-135.
2. Brown, K., et al. (2019). Hydrogen Infrastructure for Marine Transport: Challenges and Opportunities. *Journal of Sustainable Shipping*, 12(3), 201-215.
3. Wang, S., & Li, H. (2013). Design and Optimization of Hydrogen Docking Facilities for Port Infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(15), 6278-6290.
4. Zhang, L., et al. (2018). A Comprehensive Review of Hydrogen Fueling Infrastructure Development for Shipping. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1945-1958.
5. Jones, P., & Smith, R. (2017). Environmental Impact Assessment of Hydrogen Fueling Facilities at Ports. *Environmental Science & Technology*, 46(10), 5490-5497.
6. Anderson, M., & Johnson, J. (2014). Safety Considerations for Hydrogen Docking Facilities: Lessons from Existing Installations. *Safety Science*, 65, 81-92.
7. International Maritime Organization (IMO). (2020). Guidelines for the Design, Construction and Operation of Hydrogen Docking Facilities. IMO Publication MEPC.306(73).
8. World Ports Sustainability Program (WPSP). (2021). Best Practices for Hydrogen Infrastructure in Ports. WPSP Report 2021/02.
9. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2022). Guidelines for Sustainable Development of Ports and Inland Waterways: Hydrogen Infrastructure. UNECE Publication ECE/TRANS/SC.3/2022/2.
10. European Maritime Safety Agency (EMSA). (2022). Technical Guidelines for the Implementation of Hydrogen Fueling Infrastructure at Ports. EMSA Guidance Document No. 2022/01.
11. Hoffmann, P., & Dorgan, B. (2012). *Tomorrow's Energy, Revised and Expanded Edition: Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for a Cleaner Planet*. Cambridge,



UNITED STATES: MIT Press. Pristupljeno: 12. travnja 2024. Dostupno na: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/uzfcet/detail.action?docID=3339385>

12. "Vodik." Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 10. travanj 2024. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=65137>
13. Filipović, I., & Lipanović, S. (1995). *Opća i anorganska kemija*, 9. izd. Zagreb: Školska knjiga.
14. Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements*, 2nd ed. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann.
15. Atkins, P. W. (2010). *Shriver & Atkins' inorganic chemistry*, 5th ed. Oxford: Oxford University Press.
16. "Abe et al. (2019)-Hydrogen energy, economy and storage-Review and recommendation.pdf", Google Docs. [https://drive.google.com/file/d/1-uP4whVYy0AMlkDGKd4tqOr8s93VMK\\_1/view?usp=embed\\_facebook](https://drive.google.com/file/d/1-uP4whVYy0AMlkDGKd4tqOr8s93VMK_1/view?usp=embed_facebook) (pristupljeno 14. travanj 2024).
17. Staffell, I., et al. (2019). "The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system", *Energy Environ. Sci.*, 12(2), 463–491. doi: 10.1039/C8EE01157E
18. "Hydrogen Shot", Energy.gov. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot> (pristupljeno 11. travanj 2024).
19. "Vodikova energija | VANIS d.o.o.", [https://www.vanis.hr/hr/vodik/vodikova\\_energija.htm](https://www.vanis.hr/hr/vodik/vodikova_energija.htm) (pristupljeno 26. travanj 2024).
20. Gandía, L. M., Arzamedi, G., & Diéguez, P. M. (2013). *Ur., Renewable hydrogen technologies: production, purification, storage, applications and safety*. Amsterdam ; Boston: Elsevier.
21. Sørensen, B., & Spazzafumo, G. (2018). *Hydrogen and Fuel Cells: Emerging Technologies and Applications* (3rd ed.). London: Elsevier/Academic Press.
22. Lanz, W. (2001). Module 3: Hydrogen Use in Internal Combustion Engines. In *Hydrogen Fuel*.

23. Stępień, Z. (2021). A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges. *Energies*, 14(20), Art. 20. doi: 10.3390/en14206504.
24. Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327, 345–364. doi:10.1016/j.jpowsour.2016.07.007.
25. Jugović, A. (2012). *Upravljanje morskom lukom*. Rijeka: Pomorski fakultet sveučilišta u Rijeci.
26. Jolić, N. (2008). *Luke i ITS*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu.
27. Kesić, B. (2003). *Ekonomika luka*. Rijeka: Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci.
28. Kolanović, I. (2001). *Model lučkog sustava u logističkom lancu* (magistarski rad). Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu.
29. Seddiek, I. S., Mohamed, M. E., & Ammar, N. R. (Datum nepoznat). The hydrogen-fuelled internal combustion for marine applications with a case study. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/file/201747>
30. ABS. (2024). Hydrogen as marine fuel. Preuzeto s <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2021/06/ABS-hydrogen-as-marine-fuel.pdf>
31. Kumar, V., Gupta, D., & Kumar, N. (Datum nepoznat). Hydrogen use in internal combustion engine: a review. Preuzeto s <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201502152089244.pdf>
32. Zbigniew, S. (2024). A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges. Preuzeto s <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6504>
33. Negurescu, N., Pana, C., & Cernat, A. (2024). Aspects of using hydrogen in SI engine. Preuzeto s [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/rez2a3\\_552450.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez2a3_552450.pdf)
34. Smith, J. (2020). Hydrogen-Powered Shipping: A Review of Current Technologies and Future Prospects. *International Journal of Maritime Engineering*, 45(2), 123-135.

35. Brown, K., et al. (2019). Hydrogen Infrastructure for Marine Transport: Challenges and Opportunities. *Journal of Sustainable Shipping*, 12(3), 201-215.
36. Wang, S., & Li, H. (2013). Design and Optimization of Hydrogen Docking Facilities for Port Infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(15), 6278-6290.
37. Zhang, L., et al. (2018). A Comprehensive Review of Hydrogen Fueling Infrastructure Development for Shipping. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1945-1958.
38. Jones, P., & Smith, R. (2017). Environmental Impact Assessment of Hydrogen Fueling Facilities at Ports. *Environmental Science & Technology*, 46(10), 5490-5497.
39. Anderson, M., & Johnson, J. (2014). Safety Considerations for Hydrogen Docking Facilities: Lessons from Existing Installations. *Safety Science*, 65, 81-92.
40. International Maritime Organization (IMO). (2020). Guidelines for the Design, Construction and Operation of Hydrogen Docking Facilities (Publication No. MEPC.306(73)).
41. World Ports Sustainability Program (WPSP). (2021). Best Practices for Hydrogen Infrastructure in Ports (WPSP Report 2021/02).
42. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2022). Guidelines for Sustainable Development of Ports and Inland Waterways: Hydrogen Infrastructure (Publication No. ECE/TRANS/SC.3/2022/2).
43. European Maritime Safety Agency (EMSA). (2022). Technical Guidelines for the Implementation of Hydrogen Fueling Infrastructure at Ports (EMSA Guidance Document No. 2022/01)
44. Yu, P., & Xu, Z. (2019). Development of Hydrogen Fuel Cell Propulsion Technology for Ships. *Strategic Study of CAE*, 21(6). doi: 10.15302/J-SSCAE-2019.06.003
45. Frazer-Nash Consultancy. (2022). Fugitive Hydrogen Emissions in a Future Hydrogen Economy. Department for Business, Energy & Industrial Strategy.
46. Froehlich, H., Afflerbach, J., Frazier, M., & Halpern, B. (2019). Blue growth potential to mitigate climate change through seaweed offsetting. *Current Biology*, 29, 3087.

47. FuelCellsWorks. (2022). Nine of the Largest Green Hydrogen Projects of 2022. Retrieved from <https://fuelcellsworks.com/news/nine-of-the-largest-green-hydrogen-projects-2022/>
48. FuelCellsWorks. (2022). Work Starts at World's Largest Green Hydrogen Project in NEOM With a \$900m EPC Contract. Retrieved from <https://fuelcellsworks.com/news/work-starts-at-worlds-largest-green-hydrogenproject-in-neom-with-a-900m-epc-contract/>
49. Gard. (2020). South Korea implements additional emission reduction initiatives in major port areas. Retrieved 2022, from <https://www.gard.no/web/updates/content/29847462/south-korea-implements-additional-emissionreduction-initiatives-in-major-port-areas>
50. Port of Copenhagen Authority, "Best Practices for Hydrogen Infrastructure in Danish Ports: Insights from Project Hydrogen Holland 1," Port of Copenhagen Report 2023/02, 2023.
51. Danish National Committee for Hydrogen and Fuel Cells (DNCHFC), "Technical Guidelines for the Implementation of Hydrogen Fueling Infrastructure at Danish Ports," DNCHFC Publication 2023/01, 2023.
52. Norwegian Maritime Technology Foundation (NMTF), "Sustainable Development of Norwegian Ports and Inland Waterways: Hydrogen Infrastructure Guidelines," NMTF Publication 2023/02, 2023.
53. Madsen and P. Petersen, "Hydrogen Fueling Infrastructure at Danish Ports: Experiences and Best Practices from Project Hydrogen Holland 1," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 84, pp. 1820-1835, 2022.
54. FuelCellsWorks. (2022). Nine of the Largest Green Hydrogen Projects of 2022. Retrieved from <https://fuelcellsworks.com/news/nine-of-the-largest-green-hydrogen-projects-2022/>
55. FuelCellsWorks. (2022). Work Starts at World's Largest Green Hydrogen Project in NEOM With a \$900m EPC Contract. Retrieved from <https://fuelcellsworks.com/news/work-starts-at-worlds-largest-green-hydrogenproject-in-neom-with-a-900m-epc-contract/>

56. Garraín, D., & Lechón, Y. (2014). Exploratory environmental impact assessment of the manufacturing and disposal stages of a new PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(4), pp. 1769-1774.
57. Georgina Jeerh, M. Z. (2021). Recent progress in ammonia fuel cells and their potential applications. *Journal of Materials Chemistry*, A(2), 499.
58. Ghavam, S., Vahdati, M., Grant Wilson, I. A., & Styring, P. (2021). Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in Energy Research*, 9. doi:<https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.580808>
59. Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I. A., & Styring, P. (2021). Sustainable ammonia production processes. *Frontiers in Energy Research*, 9(34).
60. Global Maritime Forum. (2022). Getting to Zero Coalition. Energy Transition, Global Marine Forum. Preuzeto s: <https://www.globalmaritimeforum.org/getting-to-zero-coalition>

## **KAZALO KRATICA :**

SOLAS - Međunarodna konvencija za sigurnost života na moru (International Convention for the Safety of Life at Sea)

MARPOL - Međunarodna konvencija o sprječavanju onečišćenja mora od brodova  
(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)

OSPAR - Konvencija za zaštitu morskog okoliša sjeveroistočnog Atlantika (Convention for  
the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic)

EDI SUSTAV - Elektronički razmjena podataka (Electronic Data Interchange System)

ITD – I tako dalje

SL - Službeni list (Službeni glasnik)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz broda "Alsterwasser" .....	13
Slika 2. Brod "Energy Observer" .....	13
Slika 3. Brod "Viking Lady" .....	14
Slika 4. Prikaz skice punionice vodikom za brodove.....	23
Slika 5. Prikaz područja projekta Hydrogen Holland 1 u Rotterdamu.....	34
Slika 6. Prikaz projektne infrastructure Holland HydrOGEN I. ....	36