

*Originalni naučni rad*

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19376989>

## ZNAČAJ I MOGUĆNOSTI ŠIRE PRIMENE VODONIKA U PROCESU NISKOUGLJENIČNE TRANZICIJE

**Dejan Molnar\***

dejan.molnar@ekof.bg.ac.rs

**Marko Vučković\*\***

markovuk95@gmail.com

### Rezime

*Iako smo svedoci značajnih rezultata na planu tehnološkog i društvenog razvoja, ključni izazov u ovom veku je borba sa klimatskim promenama. Ova tema ne predstavlja samo pitanje održivosti, već i kamen temeljac budućeg razvoja društva, ekonomije i celokupnog ekosistema. U sve očiglednijem svetlu klimatskih promena i njihovih destruktivnih posledica, dekarbonizacija se postavlja kao imperativ. Njena kompleksnost zahteva interdisciplinarni pristup kroz sagledavanje ekonomskih, političkih, tehnoloških i socijalnih aspekata. Pravilno adresiranje inicijativa i instrumenata uz sveobuhvatnu adekvatnu koordinaciju procesa dekarbonizacije predstavlja prvi korak u iniciranju ovog procesa u cilju dostizanja pravedne i efikasne tranzicije. U poslednjoj deceniji, vodonik, zahvaljujući svojim jedinstvenim fizičkim i hemijskim osobinama, prepoznat je kao održivi format energetskog nosioca, koji je komplementaran sa drugim tehnološkim rešenjima i instrumentima tranzicije. Cilj ovog rada je analiza trenutnog statusa i primena vodonika u industrijskim procesima, obima tražnje u različitim sektorima i perspektive njegove šire integracije u budućem energetskom sistemu. Posebna pažnja posvećena je tehnološkim mogućnostima proizvodnje vodonika – od konvencionalnih metoda zasnovanih na fosilnim gorivima do inovativnih niskougljeničnih tehnologija, uz prateću analizu odgovarajućih kategorija troškova. Razmatrane su tehnološke mogućnosti lanca snabdevanja, sa fokusom na ekonomsku održivost za scenarije formiranja međunarodnog*

\* Ekonomski fakultet, Univerzitet u Beogradu, ORCID 0000-0002-6081-8141

\*\* Master inženjer rudarstva i master ekonomista.

*tržišta. Na kraju, sagledani su potencijali i opravdanost šire primene vodonika u različitim sektorima privrede, pri čemu je poseban akcenat stavljen na neophodnost stimulisanja inovacija, regulacije i sertifikacije.*

**Ključne reči:** vodonik, dekarbonizacija, energetska tranzicija, niskougljenične tehnologije, cost-benefit analiza

**JEL KLASIFIKACIJA:** D24, Q41, Q42, Q51, Q55.

## 1. UVOD

Početak 21. veka, kao jedno od ključnih pitanja, nametnula se opasnost od klimatskih promena, izazvanih antropogenim uticajem i posledičnim emisijama gasova sa efektom staklene bašte (Greenhouse gases - GHG). Klimatske promene se manifestuju u trendu rasta globalnih temperatura i sve ekstremnijim vremenskim uslovima. Od industrijske revolucije, ljudska aktivnost je kontinuirano povećavala emisije gasova staklene bašte, menjajući pritom temperaturu i varijable kao što su padavine, vetar i oblačnost. U 2023. godini koncentracija ugljen-dioksida u atmosferi dostigla je nivo od 419,5 ppmv (delova na milion), što predstavlja porast od 51% u odnosu na početak industrijske revolucije<sup>1</sup>. Sazrelo je shvatanje da će bez odgovarajućih mera za ublažavanje njihovog uticaja (mitigacija i adaptacija) klimatske promene imati značajne dugoročne efekte na ljude, ekosisteme i globalnu privredu. Sve veće prirodne katastrofe i trajne promene vremenskih uslova izazvane rastom emisija GHG prete da oslabe globalni ekonomski rast, uz prateće negativne efekte na nivo zdravlja, fizičku, te druge oblike imovine<sup>2</sup>.

Procenjuje se da su ekstremni vremenski uslovi, pojačani klimatskim promenama, doveli do gubitaka usled prirodnih katastrofa u vrednosti od oko 1.470 milijardi dolara samo u prethodnoj deceniji<sup>3</sup>. Pri tome, nastali su kao posledica povećanja globalne temperature iznad preindustrijskog nivoa za samo 1°C. Sprečavanje dodatnih opasnijih uticaja nalaže brzu i sveobuhvatnu tranziciju ka ekosistemima sa niskim sadržajem ugljenika u svim segmentima ljudskog delovanja, što iziskuje promene u ključnim sektorima poput energetike, agroindustrije, urbane infrastrukture, odnosno u brojnim tehnološkim

<sup>1</sup> Ritchie (2024)

<sup>2</sup> OECD (2015)

<sup>3</sup> WEF (2023)

sistemima<sup>4</sup>. Usporavanje procesa globalnog zagrevanja, kao i razvoj sistema sa niskim nivoom emisije gasova staklene bašte (niskougljenična ekonomija) smatraju se jednim od prioritarnih ciljeva savremene svetske privrede.

Dinamična priroda savremenog društva i privrede reflektuje se kroz rastuće potrebe za energijom još od perioda industrijalizacije. Poboljšanje životnog standarda, urbanizacija i industrijska ekspanzija samo su neki od aspekata modernog društva koji stimulišu ovu progresivnu tendenciju. U periodu od 1990. godine do danas, potrošnja sirove energije u prirodnom obliku (Primary Energy Consumption) povećana je za 72%<sup>5</sup>. Veći deo ove potrošnje (81%) se odnosi na fosilna goriva - pre svega na naftu (najdominantniji resurs transportnog sektora), zatim na prirodni gas i ugalj (bazne sirovine u procesu proizvodnje električne i toplotne energije). Stoga, savremene tendencije ublažavanja klimatskih promena zahtevaju pronalazak alternativnih rešenja u cilju smanjenja GHG emisija. Integracija obnovljivih izvora električne energije u različite sektore, kao što su energetika, transport i industrija, postala je globalni trend i predstavlja stratešku inicijativu narednih decenija. Ova ideologija pojavila se iz nekoliko razloga. Prvo, finansijski aspekt — obnovljivi izvori električne energije sve više postižu cenovnu konkurentnost u odnosu na tradicionalne izvore, što smanjuje potrebu za dodatnim podsticajima i olakšava njihovu implementaciju. Drugi razlog je tehnološki napredak i inovacije, koji omogućavaju zamenu fosilnih goriva električnom energijom, što je posebno vidljivo u transportu (putnička i teža vozila) i u energetici kroz širu primenu toplotnih pumpi za grejanje i hlađenje. Treći faktor odnosi se na energetska bezbednost — lokalizacija proizvodnje električne energije smanjuje zavisnost od uvoza energenata i geopolitičke volatilnosti, čime se jača otpornost sistema. Konačno, infrastrukturni naponi i razvoj regionalnih tržišta električne energije, uključujući unapređenje prenosno-distributivne mreže i implementaciju pametnih rešenja za upravljanje kapacitetima, dodatno podržavaju elektrifikaciju i efikasnu integraciju obnovljivih izvora u mrežu.

Uprkos ideji povećanja privredne elektrifikacije kao primarnog instrumenta dekarbonizacije, određeni sektori se suočavaju sa tehnološkim i ekonomskim barijerama, jer rekonstrukcija i modernizacija visoko integrisanih procesa povlači značajne troškove. Da bi se prevazišle ove barijere, neophodno je pronaći nove nosioce energije, komplementarne sa specifičnostima određenih sfera privrede, a istovremeno ekološki neutralne. Upravo u ovom kontekstu postoji hipoteza perspektive iskorišćenja vodonika i vodoničnih tehnologija.

---

<sup>4</sup> Masson-Delmotte et al. (2018)

<sup>5</sup> Energy Institute (2023)

## 2. VODONIK: INDUSTRIJSKA REALNOST I ENERGETSKE AMBICIJE

Tražnja za vodonikom većinski potiče iz nekoliko segmenata industrije, pre svega prerade nafte (rafinacije), metalurgije i proizvodnje hemikalija (većinski amonijaka i metanola). Međutim, prisutno je sve veće interesovanje za razvoj vodoničnih tehnologija i njihovu integraciju u različite segmente energetske sistema sa niskim sadržajem ugljenika. Ono proizilazi iz jedinstvenih svojstava vodonika kao što su varijativnost mogućnosti proizvodnje, visoka energetska gustina i ekološki neutralan uticaj prilikom njegovog skladištenja i iskorišćenja. Specifična energija po jedinici mase vodonika u odnosu na tradicionalna goriva (2,5 i 2,8 puta više u odnosu na prirodni gas i sirovu naftu, respektivno), implicira mogućnosti generisanja velikih količina energije bez značajnijeg doprinosa povećanju opšte težine sistema u kojima bi se vodonik koristio kao pogonsko gorivo. Sa druge strane, u odnosu na ostale energente, čiji raspon ugljeničnog intenziteta prilikom sagorevanja varira od 50 (prirodni gas) do 73 (sirova nafta) grama ugljen-dioksida po MJ (Megadžul) oslobođene energije<sup>6</sup>, sagorevanje vodonika ima nultu vrednost ovog parametra, što ga čini u ovom aspektu klimatski neutralnim.

U poslednjih nekoliko godina ukupna tražnja za vodonikom bila je na nivou od oko 95 miliona tona godišnje<sup>7</sup>, i beležila je prosečnu godišnju stopu rasta od 2,11% tokom poslednje 2 decenije (ne računajući period pandemije korona virusa). Pri tome, pomenuti trend rasta nije nastao kao rezultat povećanih napora ili pojačanih regulativa za implementaciju vodonika u različitim sektorima privrede kao alternativnog goriva, već isključivo tržišnim kretanjima u oblasti njegove tradicionalne primene, pre svega procesa rafinacije nafte i hemijske industrije. U ukupnoj strukturi tražnje za vodonikom, dominira rafinacija (44%), zatim sledi proizvodnja amonijaka (34%) i metanola (17%), a na poslednjem mestu nalazi se metalurgija sa proizvodnjom čelika (5%). Treba napomenuti da su se tokom prethodnih nekoliko godina u opštem bilansu pojavile i nove primene vodonika, međutim one su i dalje na nivou od svega 0,1%.

U procesu rafinacije nafte, vodonik se koristi u različitim procesima i reakcijama koje imaju za cilj da podignu kvalitet i efikasnost različitih

<sup>6</sup> Blok (2021)

<sup>7</sup> IEA (2023)

proizvoda prerade sirove nafte. Vodonik u ovim procesima služi za uklanjanje nečistoća i smanjenje sumpornih jedinjenja, a takođe, u kombinaciji sa drugim katalizatorima, pomaže u procesu konverzije težih ugljovodonika u lakše (benzine i druga lakša organska jedinjenja). U domenu hemijske industrije, pri proizvodnji amonijaka, vodonik se koristi kao osnovna ulazna sirovina i učestvuje u procesu direktne sinteze sa azotom pri visokim temperaturama i pritiscima (Haberov proces). Proizvodnja metanola zahteva sličnu ulogu vodonika (kao ulazne sirovine) u okviru Fišer-Tropsove reakcije. Jedina suštinska razlika je u tome što se vodonik u ovom slučaju izdava kao ko-proizvod procesa reforminga sintetičkog gasa (mešavine ugljenik-monoksida i vodonika) nastalog u procesu gasifikacije uglja, biomase ili prirodnog gasa. Najmanji deo industrijske tražnje za vodonikom beleži metalurgija, u kojoj vodonik učestvuje u procesu direktne redukcije rude u cilju stvaranja sunderastog gvožđa.

Sa druge strane, u poslednje vreme vodonik figuriše u sve većem broju nacionalnih strategija i drugih planskih dokumenata koji predviđaju njegovu širu implementaciju u privredu (dobar primer je energetska partnerstvo između Nemačke i Norveške<sup>8</sup>). Upotreba vodonika kao komplementarnog globalnog nosioca energije predstavlja značajan dugoročni interes i potencijal za dekarbonizaciju različitih segmenata ekonomije. Nacionalne strategije prepoznaju njegovu ulogu u elektroenergetici, transportu, domaćinstvima i industriji, gde se vodonik razmatra kao alternativa fosilnim gorivima i sirovinama, odnosno kao sredstvo za povećanje fleksibilnosti i otpornosti energetskih sistema. Takođe, jedna od njegovih ključnih uloga ogleda se u mogućnosti distribucije energije po sektorima i regionima (analogno prirodnom gasu), što implicira da bi u energetskim sistema budućnosti vodonik mogao da odigra značajnu ulogu u povezivanju različitih energetskih vektora u sistem sa niskim sadržajem ugljenika. Ciljevi strateških inicijativa i vizija u kojima se vodonik pojavljuje kao jedan od ključnih segmenata budućeg energetskog sistema prvenstveno su usmereni na dekarbonizaciju, diversifikaciju energetskog snabdevanja, podršku i unapređenje ekonomskog rasta<sup>9</sup>, kao i adekvatnu integraciju sa obnovljivim izvorima energije. U funkciji realizacije ovih ciljeva, planovi se prioritarno fokusiraju na direktne investicije u povećanje proizvodnih kapaciteta, uz primenu različitih ekonomskih i finansijskih mehanizama podrške, razvoj regulatornog okvira i standardizacije radi formiranja novog tržišta, unapređenje istraživačko-razvojnih aktivnosti,

---

<sup>8</sup> Đukić (2022), str. 224-225.

<sup>9</sup> O odnosu između ekonomskog rasta i energetske potrošnje više videti u: Mrkajić (2025).

kao i jačanje međunarodne saradnje. Međutim, treba istaći da se većina globalnih projekata i dalje nalazi u ranim fazama razvoja, dok relativno mali deo najavljenih kapaciteta danas proizvodi vodonik u komercijalnim uslovima<sup>10</sup>. Odlaganje donošenja konačnih investicionih odluka u pojedinim regionima u ovom trenutku predstavlja rizike povezane sa kašnjenjem i neizvesnostima u pogledu realizacije deklariranih ciljeva do 2030. godine. U celini, iako strategije i planovi signaliziraju rast tražnje i podstiču razvoj brojnih inicijativa, realna primena i komercijalizacija projekata još uvek zavise od tehničke izvodljivosti, troškova, regulatorne podrške i tržišnih uslova. Proizilazi da aktuelna upotreba vodonika ne potiče iz njegove uloge energetskog nosioca u kontekstu dekarbonizacije, već iz njegove nezamenjive funkcije kao hemijske sirovine u industrijskim procesima za koje trenutno ne postoje adekvatne tehničke ili ekonomski održive alternative. Trenutna tražnja za vodonikom stoga reflektuje strukturu i dinamiku tradicionalnih industrijskih sektora, dok njegova šira primena kao klimatski prihvatljivog energetskog nosioca ostaje ograničena i pre svega uslovljena budućim tehnološkim napretkom i smanjenjem troškova niskougledničkih alternativnih rešenja proizvodnje i upotrebe.

### **3. ODRŽIVA PROIZVODNJA VODONIKA – TEHNOLOŠKE OPCIJE I EKONOMSKE IMPLIKACIJE**

Tehnologije za proizvodnju vodonika poznate su već duže vremena, a dostigle su nivo komercijalne upotrebe već početkom 20. veka. Prema statističkim podacima IEA za 2024. godinu, na globalnom nivou proizvedeno je oko 95 miliona tona vodonika, od čega 83% čine sirovine na bazi fosilnih goriva (prirodni gas i ugalj) u procesima reforminga i gasifikacije, dok ostatak predstavlja proizvodnja vodonika kao nusproizvoda u određenim tehnološkim procesima (rafinacije i hemijske industrije) sa udelom od 16%. Niskouglednične varijante učestvuju sa oko 600-900 hiljada tona proizvedenog vodonika na godišnjem nivou, čineći „svega“ oko 0,6-0,9% ukupnih kapaciteta (od kojih se 85% zasniva na proizvodnji plavog vodonika, baziranog na fosilnim gorivima uz integraciju tehnologija za kaptiranje emitovanog ugljen-dioksida, dok je 15% proizvodnje ostvareno na bazi tehnologija elektrolize). Iako su danas najzastupljenije komercijalne tehnologije bazirane na proizvodnji iz fosilnih goriva, koje su usled svoje cenovne konkurentnosti, visokog stepena efikasnosti

<sup>10</sup> IEA (2024)

i tradicionalne sinergije sa tehnološkim lancima u kojima se vodonik koristi postale prioritetna tehnička rešenja, proces energetske tranzicije i ublažavanja klimatskih uticaja nameće akcenat na niskougljenične načine proizvodnje. Podrška razvoju ovih sistema kroz sve veću implementaciju projekata, uspostavljanje lanaca snabdevanja ključnim komponentama, obezbeđivanje investicija u naučno-istraživačkoj sferi i primenu različitih finansijskih i regulatornih mehanizama, može doprineti preorijentaciji proizvodnih kapaciteta ka održivijim varijantama, čime bi se u perspektivi unapredila njihova cenovna konkurentnost u odnosu na konvencionalna rešenja.

U savremenoj praksi definisano je šest osnovnih „boja“ vodonika, u skladu sa standardima Evropske unije, koje se razlikuju prema primenjenim tehnološkim rešenjima za njegovu proizvodnju. Ove varijante se uslovno mogu podeliti u dve osnovne grupe: (1) termohemijske procese, koji obuhvataju gasifikaciju, pirolizu i reforming, i (2) elektrohemijske procese, zasnovane na elektrolizi vode<sup>11</sup>. *Sivi vodonik* predstavlja najrasprostranjeniji oblik proizvodnje i zasniva se na termohemijskim procesima koji koriste fosilna goriva, pre svega ugalj i prirodni gas, pri čemu se celokupna količina ugljen-dioksida nastala u procesu emituje u atmosferu. Gasifikacija uglja podrazumeva termohemijsku konverziju uglja u gasovite produkte, uključujući vodonik i ugljen-monoksid, pri visokim temperaturama i pritiscima, uz prisustvo vodene pare i kiseonika, dok se kao nusproizvodi javljaju čvrsti ostaci poput katrana. Parni reforming prirodnog gasa zasniva se na reakciji ugljovodonika sa vodenom parom na povišenim temperaturama, uz primenu katalizatora (najčešće na bazi nikla), pri čemu nastaje sintetički gas. Naknadnom reakcijom sa vodenom parom generišu se dodatne količine vodonika, koji se u završnoj fazi procesa izdvaja selektivnom adsorpcijom. *Plavi vodonik* proizvodi se na bazi fosilnih goriva korišćenjem klasičnih termohemijskih procesa reforminga i gasifikacije, uz dodatak tehnologije za hvatanje i separaciju ugljen-dioksida iz izduvnih i drugih procesnih gasova (CCUS). Ovim se značajno smanjuje ugljenični otisak, čineći plavi vodonik interesantnim u dugoročnoj energijskoj tranziciji. Piroliza predstavlja još jedan potencijalno održiv način proizvodnje vodonika iz fosilnih goriva (pre svega prirodnog gasa/metana), pri čemu se proces može sprovesti bez sagorevanja, a kao produkti nastaju vodonik i čvrsti ugljenik (*Tirkizni vodonik*). Međutim, ova tehnologija još nije komercijalizovana i trenutno je u fazi laboratorijskih i pilot projekata<sup>12</sup>. Elektroliza omogućava proizvodnju vodonika bez upotrebe fosilnih goriva, koristeći jednosmernu struju koja

---

<sup>11</sup> European Parliament (2023)

<sup>12</sup> Merida (2023)

prolazi kroz elektrolit (vodu) i razdvaja jone vodonika i kiseonika. Razlika u „bojama“ elektroliznog vodonika zavisi od izvora električne energije: *žuti vodonik* koristi nuklearnu energiju, dok *narandžasti* koristi električnu energiju iz mreže, što može dovesti do visokog ugljeničnog otiska. Najperspektivniji oblik je *zeleni vodonik*, napajan električnom energijom iz obnovljivih izvora, čime se postiže klimatska neutralnost i održivost proizvodnje. U kontekstu energetske tranzicije, fokus budućeg razvoja sektora biće na plavom i zelenom vodoniku.

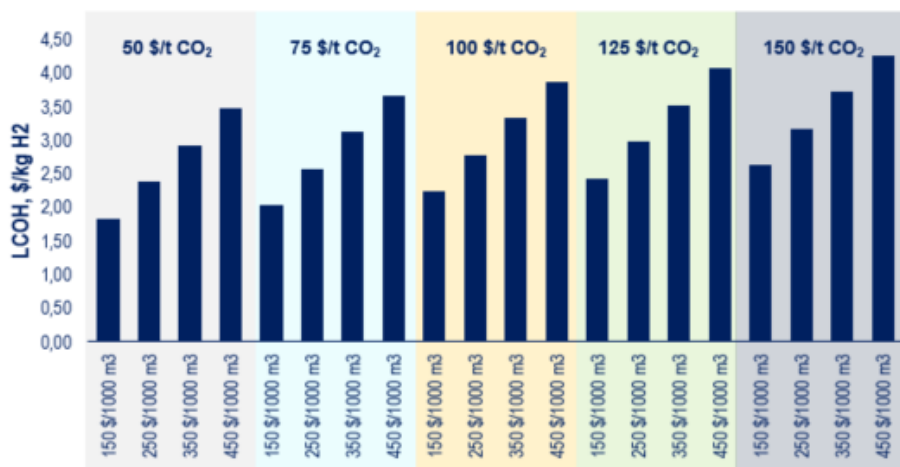
Teuća cena koštanja proizvodnje sivog vodonika putem gasifikacije i reforminga, prema našim proračunima zasnovanim na statističkim podacima i projektima-analozima, kreće se u rasponu od 1,54 do 1,81 \$/kg. Cena je izražena kroz parametar LCOH (Levelized Cost of Hydrogen), koji ponderiše kapitalna ulaganja i operativne troškove u odnosu na ukupnu godišnju proizvodnju vodonika tokom životnog ciklusa projekta (25 godina). Pretpostavke proračuna uključuju diskontnu stopu od 6%, cenu prirodnog gasa od 200 \$/1.000 m<sup>3</sup>, cenu uglja od 90 \$/t, dok kapitalna ulaganja (CAPEX) iznose 500–900 \$/kWh<sub>2</sub> (LHV – svedeno na električnu snagu proizvedenog vodonika preko donje toplotne moći i stepena efikasnosti postrojenja) za reforming i 1.400–1.700 \$/kWh<sub>2</sub> (LHV) za gasifikaciju. Stepenn efikasnosti postrojenja je 60–76%<sup>13</sup>, dok su operativni troškovi definisani na nivou od 4–5% CAPEX-a godišnje. Integracija tehnologija CCUS smanjuje emisije za ~60-90%<sup>14</sup>, ali povećava ukupne troškove proizvodnje za 32–34% zbog dodatnih kapitalnih ulaganja i operativnih troškova povezanih sa hvatanjem i utilizacijom kaptiranog ugljen-dioksida (Grafik 1).

---

<sup>13</sup> Griffin (2022)

<sup>14</sup> Cakici et al. (2025)

Grafik 1. Analiza osetljivosti ponderisane cene koštanja proizvodnje „plavog“ vodonika u zavisnosti od cena sirovine i ukupnih troškova utilizacije ugljen-dioksida



Izvor: samostalni proračun i prikaz autora.

Proizvodnja zelenog vodonika iz obnovljivih izvora energije, kao što su energija vetra i sunca, smatra se za ključni pravac daljeg razvoja ove vrste tehnologija, s obzirom na to da u ovom procesu ne dolazi do direktnih emisija ugljen-dioksida. Danas su komercijalno dostupne tri glavne tehnologije elektrolize: alkalna elektroliza (ALK), elektroliza sa protonskim izmenjivačkim membranama (PEM) i elektroliza na bazi čvrstog oksida (SOEC). U periodu od 2015. do 2023. godine zabeležen je snažan rast instalisanih kapaciteta, pre svega kod alkalnih i PEM tehnologija, pri čemu je kumulativna snaga sistema povećana 5,8 puta. Paralelno s tim, rastao je i obim pojedinačnih projekata, koji danas dostižu snage od nekoliko desetina do nekoliko stotina megavata, odnosno proizvodnju od više desetina hiljada tona vodonika godišnje. Analiza kapitalnih ulaganja pokazuje da je povećana primena elektrolizera tokom poslednje decenije dovela do značajnog smanjenja troškova. Prema prosečnim vrednostima i trendovima kapitalnih troškova po jedinici instalisane snage, u periodu od 2012. do 2022. godine zabeležen je pad troškova u rasponu od 34–42%. Pored investicionih troškova, važan parametar rada sistema predstavlja i specifična potrošnja električne energije, definisana kao količina energije potrebna za proizvodnju jednog kilograma vodonika. Za alkalne elektrolizere

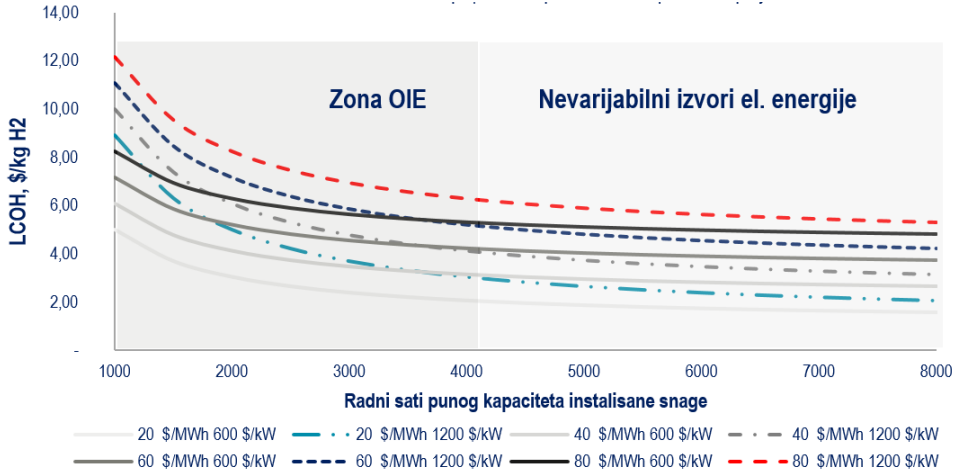
ova vrednost iznosi oko 50 kWh/kg H<sub>2</sub>, dok kod PEM tehnologije iznosi približno 55 kWh/kg H<sub>2</sub><sup>15</sup>.

Na osnovu definisanih ulaznih pretpostavki sprovedena je analiza osetljivosti ponderisane cene koštanja proizvodnje zelenog vodonika primenom alkalne elektrolize, kao trenutno najrasprostranjenije i najzrelije tehnologije. Operativni troškovi obuhvataju troškove električne energije, održavanja sistema i periodične zamene ključnih komponenti elektrolizera. Međutim, osim cene električne energije, ključni ograničavajući faktor predstavlja varijabilnost obnovljivih izvora, koja se direktno reflektuje kroz broj efektivnih radnih sati elektrolizera tokom godine. Zbog nekontinuiranog karaktera proizvodnje električne energije iz solarnih i vetroelektrana, broj punih radnih sati značajno je niži u poređenju sa konvencionalnim izvorima, i tipično se kreće u rasponu od 1.000 do 4.000 sati godišnje, u zavisnosti od geografskih i klimatskih uslova. Analiza pokazuje da povećanje broja radnih sati do približno 4.000 godišnje dovodi do izraženog smanjenja cene koštanja proizvodnje vodonika, u rasponu od 35% do 64%, naročito u scenarijima sa višim kapitalnim ulaganjima. Ovo se može objasniti efikasnijom raspodelom fiksnih troškova na veću količinu proizvedenog vodonika. Međutim, daljim povećanjem broja radnih sati efekat smanjenja cene se postepeno stabilizuje, jer cena električne energije postaje gotovo jedina determinanta ukupnih troškova, s obzirom na njenu proporcionalnost sa obimom proizvodnje (Grafik 2).

---

<sup>15</sup> European Commission JRC (2023)

Grafik 2. Analiza osetljivosti cene koštanja proizvodnje zelenog vodonika u zavisnosti od broja radnih sati, kapitalnih ulaganja i cene električne energije iz obnovljivih izvora



Izvor: samostalni proračun i prikaz autora.

Prethodni rezultati ukazuju na strukturni izazov proizvodnje zelenog vodonika zasnovane isključivo na varijabilnim obnovljivim izvorima energije. Iako pad cena električne energije dobijene iz OIE značajno poboljšava ekonomsku isplativost, ograničeni broj radnih sati i sezonska neujednačenost proizvodnje ostaju ključni faktori koji usporavaju smanjenje troškova. Shodno tome, dugoročna konkurentnost zelenog vodonika biće koncentrisana u regionima sa povoljnim prirodnim uslovima za proizvodnju obnovljive energije, kao i u sistemima koji omogućavaju povećanje faktora iskorišćenja elektrolizera kroz kombinaciju različitih izvora ili integraciju sa elektroenergetskom mrežom.

U postojećim tržišnim uslovima, niskougljenične tehnologije proizvodnje vodonika, uključujući plavi i zeleni vodonik, i dalje su ekonomski nepovoljnije u poređenju sa konvencionalnom proizvodnjom sivog vodonika, pre svega zbog viših kapitalnih ulaganja, dodatnih operativnih troškova i, u slučaju zelenog vodonika, zavisnosti od cene i varijabilnosti električne energije iz obnovljivih izvora. Međutim, ova razlika u troškovima ne predstavlja trajnu prepreku, već odraz trenutne faze energetske tranzicije, jer se uvođenjem instrumenata za oporezivanje emisija ugljen-dioksida, sistema trgovine emisijama i drugih mehanizama internalizacije eksternih troškova fosilnih goriva može očekivati postepeno pogoršanje konkurentnosti sivog vodonika,

dok bi istovremeno tehnološko učenje, ekonomija obima i regulatorni podsticaji mogli omogućiti plavom i zelenom vodoniku da u srednjoročnoj i dugoročnoj perspektivi dostignu cenovnu konkurentnost.

#### 4. SEKTORSKA PERSPEKTIVA ŠIRE PRIMENE VODONIKA

Specifične fizičke karakteristike kao što su visoka energetska gustina na jedinicu mase i nulti nivo emisija ugljen-dioksida prilikom sagorevanja, učinile su vodonik interesantnim sa aspekta šireg iskorišćenja i u drugim procesima (koji su u ovom trenutku usko povezani sa korišćenjem fosilnih goriva) u cilju dekarbonizacije.

Vodonik u energetici može da se koristi u praktično istim ili sličnim procesima kao i prirodni gas, kako u generaciji električne energije u turbinama i klipnim motorima, tako i za potrebe različitih vrsta grejanja ili kogeneracije putem upotrebe gorivnih ćelija. Gorivne ćelije su elektrohemijski uređaji koji direktno pretvaraju hemijsku energiju vodonika u električnu energiju, uz sporednu proizvodnju toplote i vode. Njihova prednost je visoka efikasnost i odsustvo emisija ugljen-dioksida pri radu, što ih čini pogodnim za održive energetske sisteme. Zahvaljujući modularnosti i fleksibilnosti, mogu se koristiti u različitim aplikacijama – od napajanja domaćinstava i vozila do podrške elektroenergetskim mrežama<sup>16</sup>. Međutim, posmatrano kroz celokupan tehnološki lanac, primena gorivnih ćelija u domaćinstvima ostaje upitna usled postojanja komercijalno dostupnih alternativa direktne elektrifikacije, poput toplotnih pumpi, solarne, geotermalne energije ili biogoriva, koji su se u poslednje vreme pokazali kao dominantan i efikasan alat dekarbonizacije. Sa druge strane, izazov predstavljaju i sigurnosni standardi upotrebe vodonika i nedostatak razvijene distributivne infrastrukture. Za sada, koncepcije generacije električne i toplotne energije na bazi gorivnih ćelija u domaćinstvima su demonstrirane kroz nekoliko pilot projekata, ali bez masovne infrastrukture, programa subvencija i nižih troškova, teško je očekivati širu komercijalnu upotrebu. Energetski sektor se već uveliko suočava sa izazovima u pogledu fleksibilnosti zbog sve veće integracije obnovljivih izvora, posebno solarnih i vetroelektrana, što dovodi do sve češće neusklađenosti ponude i tražnje. Rešenja se traže kroz razvoj dinamičkih mreža, regionalnih tržišta, kapaciteta za skladištenje, kao i upravljanja tražnjom. U domenu fleksibilne

<sup>16</sup> Staffell, I. et al (2019)

proizvodnje električne energije, vodonik može doprineti stabilizaciji sistema korišćenjem gasnih turbina (stabilnih izvora proizvodnje sa brzim vremenom odziva) koje direktno koriste vodonik kao pogonsko gorivo. Za dugoročno skladištenje energije, on se može konvertovati u amonijak ili metanol, ili skladištiti u podzemnim strukturama analogno prirodnom gasu. Iako su današnje tehnologije skladištenja uglavnom pogodne za kratke periode (izuzev regionalno ograničenih reverzibilnih hidroelektrana), vodonik se ističe kao poželjna opcija za sezonsko skladištenje velikih količina energije. Time se obezbeđuje dugoročna energetska rezerva iz klimatski neutralnih izvora, što je posebno značajno u kontekstu energetske tranzicije.

Transportni sektor učestvuje sa oko 21% u globalnim emisijama gasova staklene bašte i čini jednu četvrtinu finalne potrošnje energije, pri čemu naftni derivati imaju udeo od oko 90%. Do danas, upotreba vodonika u ovom sektoru bila je ograničena na svega 0,01% ukupne potrošnje energije<sup>17</sup>, ali vodonik i goriva na njegovoj bazi mogu doprineti dekarbonizaciji, naročito u segmentima koji su limitirani za elektrifikaciju – teški transport na velike udaljenosti (kamioni), brodski transport i avijacija. Primena vodonika moguća je kroz motore sa unutrašnjim sagorevanjem, turbine ili gorivne ćelije. Iako je tehnologija motora sa vodoničnim pogonom razvijena još sredinom 20. veka, gorivne ćelije su sa vremenom dobile prednost zbog veće efikasnosti konverzije energije i odsustva buke.<sup>18</sup> Danas postoje ne samo pilot-projekti i prototipi, već i mala serijska proizvodnja vozila sa vodoničnim pogonom, što potvrđuje njegovu rastuću perspektivu u sektoru transporta. Iako postoji veliki broj inicijativa za korišćenje vodoničnih vozila, mali putnički automobili će u perspektivi prioritet dati elektrifikaciji, zahvaljujući kraćim opsezima vožnje, razvijenoj infrastrukturi i zreloj komercijalizaciji tehnologije. Bez obzira na kraće vreme punjenja i veću autonomiju kod vozila sa gorivnim ćelijama, statistika pokazuje da električna vozila već zadovoljavaju potrebe prosečne kilometraže u Euro-zoni, uz viši stepen ukupne energetske efikasnosti. Međutim, u segmentu teškog teretnog transporta, gde su dnevne kilometraže znatno veće, vodonik ima prednost zahvaljujući manjoj težini sistema, većem dometu i bržem punjenju, što ga čini pogodnim rešenjem za dekarbonizaciju ovog vida transporta.

Tehnologije iskorišćenja vodonika i gorivnih ćelija demonstrirane su prethodnih godina i u oblasti železnice, gde se očekuje primena ovih rešenja u uslovima otežane elektrifikacije u budućnosti. U domenu broskog

---

<sup>17</sup> IEA (2025)

<sup>18</sup> Štepić (2021)

transporta, takođe postoje određeni pilot-projekti iskorišćenja gorivnih ćelija u kratkim relacijama, usled dovoljno male energetske zapremine gustine vodonika. Međutim, sintetička goriva na bazi vodonika predstavljaju interes u preokookeanskim plovilima. Zeleni ili niskouglenični amonijak se posebno može koristiti u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem kako bi se eliminisala emisija ugljen-dioksida iz plovila. Metanol se takođe pokazao kao gorivo za pomorski sektor i predstavlja relativno zreliju tehnologiju od vodonika i amonijaka. Zbog njegove kompatibilnosti sa postojećim pomorskim motorima, metanol bi mogao biti kratkoročno rešenje za smanjenje emisija u transportu, ali dugoročno amonijak nudi veći potencijal za dekarbonizaciju, s obzirom da predstavlja gorivo bez ugljenika u svom sastavu. Međutim, upotreba amonijaka kao pogonskog goriva u plovilima, zahteva prilagođavanje sistema motora usled različitih brzina sagorevanja i zapaljivosti u odnosu na dizel, kao i kontrole emisija oksida-azota. Takođe, važan aspekt su i adekvatne bezbednosne procedure na plovilima usled toksičnosti ovog hemijskog jedinjenja. Inovativna vodonična rešenja u avijaciji takođe su predmet interesovanja i trenutno su u fazi ispitivanja, gde direktna upotreba vodonika i gorivnih ćelija zahteva nove dizajne sistema aviona usled potreba za tehnološkim rešenjima skladištenja vodonika u tečnom obliku, što direktno utiče na njihove dimenzije (veći rezervoari), pozicioniranje u avionu, a samim tim i aerodinamičku konfiguraciju i raspored težine. Sa druge strane, direktno sagorevanje vodonika u motorima zahteva prilagođavanje komora za sagorevanje usled drugačijih svojstava zapaljivosti u odnosu na kerozin, dok je u slučaju gorivnih ćelija neophodan potpuno novi sistem prenosa energije usled prelaska letelice na električni pogon. Proizilazi da bi vodonik u perspektivi mogao da bude izuzetno značajan u oblasti dekarbonizacije saobraćaja, ali da je za njegovu širu primenu neophodan dalji tehnološki napredak i dostizanje komercijalnih rešenja koja bi obezbedila cenovnu konkurentnost. Razvoj infrastrukture za snabdevanje vodonikom, po uzoru na mrežu elektro-punjača, kao i serijska proizvodnja različitih tipova transporta kroz ekonomiju obima, mogli bi da omoguće veću integraciju i postepenu diversifikaciju od fosilnih goriva u ovom sektoru.

Industrijska upotreba vodonika postoji već dugi niz godina i podrazumeva njegovo korišćenje kao sirovine u procesima poput rafinacije, hemijske industrije i metalurgije. Danas je praktično kompletna količina proizvedenog i upotrebljenog vodonika usmerena na ova tri osnovna segmenta industrije. Zbog toga se pretpostavlja da će u kratkom i srednjem roku upravo u tim procesima biti najveći akcenat na integraciju niskougleničnog vodonika,

jer su to tehnološki formirani procesi koji ne zahtevaju značajne promene konfiguracija za njegovo korišćenje. Jedina izmena odnosi se na preusmeravanje proizvodnje vodonika sa fosilnih goriva ka održivim varijantama, poput plavog ili zelenog vodonika, kako bi ovi procesi bili usklađeni sa politikom energetske tranzicije. U sektoru rafinacije, koji troši oko 44% ukupnih količina vodonika, njegova primena je ključna u procesima hidrosulfurizacije radi smanjenja sumpornih primesa i u hidrokrekingu za pretvaranje težih frakcija u lakše derivate poput benzina i dizela. Kontinuirano smanjenje dozvoljenog sadržaja sumpora i rast tražnje za lakim derivatima podstiču veću potrošnju vodonika u ovom sektoru. Ipak, energetska tranzicija predviđa postepeno smanjenje uloge nafte i njenih derivata, što može ograničiti buduću potrošnju vodonika i usporiti investicije u nove održive konfiguracije. Sa druge strane, vodonik će imati značajnu ulogu i u proizvodnji biogoriva, gde je neophodan za uklanjanje kiseonika i poboljšanje kvaliteta proizvoda, čime se otvaraju nove dodatne mogućnosti njegove rafinacijske primene. Hemijska industrija u današnje vreme učestvuje sa 50% udela u ukupnoj tražnji i predstavlja najkrupniji segment ovog tržišta, gde se vodonik koristi kao hemijska sirovina za proizvodnju određenih hemikalija, dominantno amonijaka i metanola. Interes za širom upotrebom produkata hemijske industrije u segmentima transporta, skladištenja i distribucije energije bezuslovno će uticati na porast tražnje za vodonikom kao osnovnom sirovinom za proizvodnju, međutim širenje fokusa implementacije amonijaka i metanola u cilju supstitucije tradicionalnih energenata i tehnologija ne može doći bez rekonfiguracije postojećih sistema proizvodnje ka niskougleničnim opcijama. U ovom segmentu, tendencije mora da prati i sama proizvodnja vodonika, prelazeći ka klimatski manje ili potpuno neutralnom plavom i zelenom. Iako inkrementalni troškovi nadogradnje sistema povećavaju cenu koštanja izlazne produkcije, klimatski intenzitet ovog sektora biće predmet fokusa kreatora politika kroz uvođenje sistema oporezivanja emisija, čime će se dostići nivo cenovne konkurentnosti sa alternativnim održivim rešenjima od kojih se takođe očekuje određeni nivo tehnološkog napretka i efikasnosti. U proizvodnji gvožđa i čelika vodonik se koristi u obimu od oko 10% ukupne industrijske tražnje, pre svega u DRI-EAF procesu (direktno redukovano gvožđe u elektrolučnoj peći), koji trenutno učestvuje sa približno 7%<sup>19</sup> u globalnoj proizvodnji sirovog čelika. Visoke ambicije u dekarbonizaciji metalurgije doprineće razvoju novih primena vodonika, pri čemu je osnovni pokretač rasta DRI-EAF proces. Jedna od mogućnosti jeste mešanje čistog vodonika sa ugljem ili prirodnim gasom

---

<sup>19</sup> Kim, S. et al (2024)

u visokim pećima DRI procesa, što predstavlja korak ka proizvodnji sirovog čelika sa gotovo nultom emisijom. Druga opcija je korišćenje vodonika u pećima za proizvodnju toplote u završnim fazama obrade čelika (u ovim procesima tehnički nije izvodljiva direktna elektrifikacija kao instrument smanjenja emisija)<sup>20</sup>. Većina ovih rešenja trenutno se nalazi u pilot ili demonstracionoj fazi, a njihova šira implementacija zavisi od daljeg tehnološkog razvoja i postizanja cenovne konkurentnosti po uzoru na hemijsku industriju.

## 5. ZAKLJUČAK

Dabise u perspektivi dostigli ciljevi postizanja ugljenične neutralnosti do polovine 21. veka, vlade moraju preuzeti vodeću ulogu u olakšavanju tranzicije ka čistoj energiji uspostavljanjem okvira politike koji stimulišu integrisano delovanje. U kontekstu vodonika, regulativa bi trebalo da se usredsredi na razvoj strategija i mapa puta za integraciju u različite sektore privrede, u cilju postizanja sinergetskog efekta sa drugim instrumentima stimulisanja procesa energetske tranzicije. Neophodno je stvoriti snažnu inicijativu za proizvodnju niskougljeničnog vodonika kao prvog koraka supstitucije tradicionalnih tehnoloških rešenja. Važno je aktivirati javna i privatna finansijska sredstva za investicije u proizvodne kapacitete, infrastrukturu i krajnju upotrebu. Takođe, nužno je obezbediti snažnu podršku inovacijama kako bi se omogućila ubrzana komercijalizacija prioriternih tehnologija. Posebnu pažnju treba posvetiti uspostavljanju odgovarajuće sertifikacije, standardizacije i regulative duž celokupnog tehnološkog lanca.

Vodonik, zahvaljujući svojim jedinstvenim fizičkim i hemijskim osobinama, kao i različitim varijacijama proizvodnih mogućnosti, predstavlja održivi format energetske nosioca koji je komplementaran sa drugim tehnološkim rešenjima i instrumentima dostizanja duboke dekarbonizacije. U toku tranzicije, prioriterno stimulisanje određenih pravaca razvoja, kao što je potpuna privredna elektrifikacija bazirana isključivo na obnovljivim izvorima električne energije, ne može da odgovori na sve izazove mitigacije emisija štetnih gasova u perspektivi. Za dostizanje održivog koncepta niskougljenične ekonomije potreban je fokus na sistemski i kros-funkcionalni pristup u cilju stvaranja širih tehnoloških lanaca koji se međusobno dopunjuju sa aspekta efikasnosti, pri čemu se odustaje od momentuma trenutne finansijske

---

<sup>20</sup> Basirat (2024)

isplativosti pojedinih tehnologija. U ovom kontekstu, elektrifikacija, zajedno sa vodoničnim tehnologijama, koje možda trenutno nisu cenovno konkurentne sa tradicionalnim rešenjima, otvara perspektive mogućnosti šire sinergetske implementacije u onim segmentima privrede gde njihova pojedinačna upotreba ne predstavlja efikasno rešenje.

Budućnost vodonika neće zavisiti isključivo od političkih deklaracija ili idealističkih koncepcija „vodonične ekonomije“, već u velikoj meri od realnih tehnoloških napredaka, smanjenja troškova duž lanca vrednosti i jasnog definisanja sektora u kojima vodonik poseduje stvarnu komparativnu prednost. U tom kontekstu, realniji i održiviji scenario podrazumeva selektivnu i pragmatičnu integraciju vodonika u one segmente energetskog sistema gde njegova primena doprinosi povećanju efikasnosti uz postizanje razumnog nivoa cenovne konkurentnosti i ekonomske održivosti u poređenju sa alternativnim tehnologijama.

## **SIGNIFICANCE AND POSSIBILITIES OF WIDER HYDROGEN APPLICATION IN THE PROCESS OF LOW-CARBON TRANSITION**

### **Abstract**

*Although humanity has witnessed significant achievements in technological and social progress, the central challenge facing civilization in this century remains the fight against climate change. This issue is not merely a matter of sustainability, but rather a cornerstone of future societal, economic, and ecological development. In the increasingly evident context of climate change and its destructive consequences, decarbonization emerges as an imperative. Its complexity requires an interdisciplinary approach that encompasses economic, political, technological, and social dimensions. Properly addressing initiatives and instruments, alongside comprehensive coordination of decarbonization processes, represents the first step toward achieving a just and efficient transition. Over the past decade, hydrogen has been recognized—thanks to its unique physical and chemical properties—as a sustainable energy carrier, complementary to other technological solutions and transition instruments. The aim of this paper is to analyze the current status and applications of hydrogen in industrial processes, the scale of demand across different sectors, and the perspectives for its broader integration into the future energy system. Particular attention is devoted to*

*technological pathways for hydrogen production, ranging from conventional fossil-based methods to innovative low-carbon technologies, accompanied by a cost analysis of the entire system. Furthermore, supply chain options are examined, with emphasis on economic viability in scenarios of international market formation. Finally, the paper assesses the potential and justification for wider hydrogen deployment across various sectors of the economy, with a special focus on the necessity of stimulating innovation, regulation, and certification.*

**Key words:** Hydrogen, Decarbonization, Energy transition, Low-carbon technologies, Cost-benefit analysis

## LITERATURA

Basirat, S. (2024), *Hydrogen unleashed: Opportunities and challenges in the evolving H<sub>2</sub>DRIEAF pathway*, Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA Insights).

Blok, K., Nieuwlaar, E. (2021). Introduction to energy analysis, 3rd ed., pp. 160–179, Routledge.

Çakıcı, İ., Sakarya, E. E., Kazem, H. A., et al. (2025), “CCUS integration in hydrogen production: Technological advances, sectoral applications, and future perspective”, *Clean Energy Technologies Journal*, Vol. 3, No. 2, Pp. 50–61.

Đukić, S. (2022), *Energetska (gasna) tranzicija u Evropi*, Ekonomski vidici, vol. XXVII, br. 3-4.

Energy Institute (2023), *Statistical Review of World Energy*, Energy Institute, London.

European Commission, Joint Research Centre (JRC) (2023), *Energy efficiency of water electrolyzers for hydrogen production*, JRC Technical Report, European Commission.

European Parliament (2023), *EU rules for renewable hydrogen: Delegated regulations on a methodology for renewable fuels of non-biological origin*, European Parliamentary Research Service, Briefing, Brussels.

Feng, C. (2023), “Promoting renewable energy through national energy legislation”, *Energy Economics*, Vol. 118, Article 106504.

Griffin, S. (2022), *Blue Hydrogen: Modelling the Efficiency of a Steam Methane Reformer*, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Strathclyde.

Ho, S. S. (2019), “Environmental Debates over Nuclear Energy: Media, Communication, and the Public”, *Environmental Communication*, Vol. 13, Pp. 431–439.

IEA (2023), *Global Hydrogen Review 2023*, International Energy Agency, Paris.

IEA (2024), *Hydrogen projects database*, International Energy Agency, Paris.

IEA (2025), *Global Hydrogen Review 2025*, International Energy Agency, Paris.

Islam, M., Shahbaz, M. and Samargandi, N. (2024), “The nexus between Russian uranium exports and US nuclear-energy consumption: Do the spillover effects of geopolitical risks matter?”, *Energy*, Vol. 293, Article 130481.

Kim, S., Zhang, X., Schweinar, K., Souza F. (2024). *Direct reduction of iron to facilitate net zero emissions in the steel industry: A review of research progress at different scales*. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 441, Article 140933

Masson-Delmotte, V., Zhai, P. et al. (2018), *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report*, Cambridge University Press, Cambridge.

Mrkajić, M. (2025), *Odnos između ekonomskog rasta i energetske potrošnje*, *Ekonomski vidici*, vol. XXX, br. 1-2.

OECD (2015), *The Economic Consequences of Climate Change*, OECD Publishing, Paris.

Ritchie, H., Roser, M. and Rosado, P. (2024), *CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions*, Our World in Data.

Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., and Ward, K. R. (2019), “The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system”, *Energy & Environmental Science*, Vol. 12, No. 2, Pp. 463–491.

Stępień, Z. (2021), “A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges”, *Energies*, Vol. 14, No. 20, Article 6504.

UK Government (2023), *Hydrogen Transport and Storage Cost Report*, Department for Energy Security & Net Zero.

World Economic Forum (2023), *This is what the climate crisis is costing economies around the world*, World Economic Forum.

Yang, M., Hunger, R., Berrettoni, S., Sprecher, B., and Wang, B. (2023), “A review of hydrogen storage and transport technologies”, *Clean Energy*, Vol. 7, No. 1, Pp. 190–216, Oxford Academic.