

# Energetska učinkovitost obnovljivih izvora energije

---

**Macinić, Matej**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:744221>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-17**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Stručni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

**Energetska učinkovitost obnovljivih izvora energije**

Rijeka, Srpanj 2023.

Matej Macinić

0069077534

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Stručni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

**Energetska učinkovitost obnovljivih izvora energije**

Mentor: Mr. sc. Marijana Živić Đurović

Rijeka, Srpanj 2023.

Matej Macinić

0069077534

Rijeka, 27. veljače 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Elementi elektroenergetskih postrojenja**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Matej Macinić (0069077534)**  
Studij: **Stručni prijediplomski studij elektrotehnike**

Zadatak: **Energetska učinkovitost obnovljivih izvora energije / Energy efficiency of renewable energy sources**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati obnovljive izvore energije te potencijal njihovog iskorištenja. Opisati zakonsku regulativu vezanu uz obnovljive izvore energije. Analizirati energetske učinkovitost fotonaponskih sustava te vjetroelektrana. Opisati glavne ciljeve korištenja obnovljivih izvora energije.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: *Matej Macinić* 20. ožujka 2023.

Mentor:

*Marijana Živić Đurović*  
Mr. sc. Marijana Živić Đurović, v. pred.

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

*Dubravko Franković*  
Prof. dr. sc. Dubravko Franković

## Izjava o samostalnoj izradbi rada

Izjavljujem da sam završni rad pod naslovom „Energetska učinkovitost obnovljivih izvora energije“ izradio samostalno, temeljem vlastitog istraživanja i analize. U skladu s odredbama članka 7, stavka 1, pravilnika o završnom radu, potvrđujem da sam tijekom izrade ovog rada samostalno prikupljao podatke, analizirao ih i izveo zaključke bez pomoći drugih osoba. Sva literatura, izvori i resursi koji su korišteni u izradi ovog završnoga rada navedeni su u popisu literature.

Rijeka, Srpanj 2023.

Matej Macinić

---

## **Zahvalnica**

Zahvaljujem se mentorici Mr. sc. Marijani Živić Đurović na podršci, vodstvu i mentorstvu tijekom pripreme i izrade mog završnog rada. Njene vrijedne povratne informacije, konstruktivne kritike i smjernice bile su mi od neprocjenjive važnosti. Zahvaljujući opisanom mentorstvu, uspio sam izgraditi čvrsto utemeljen Završni rad.

Zahvaljujem se na dostupnosti i pruženoj podršci. Posebno se zahvaljujem na strpljenju i otvorenosti za razgovor o svakoj temi i pitanju. Nadam se da će mentorstvo i inspiracija biti preneseno i drugim, budućim studentima na isti način kako je to i mene obuhvatilo.

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Obnovljivi izvori energije .....	2
2.1. Hidroenergija .....	6
2.2. Solarna energija .....	8
2.3. Energija vjetra .....	10
2.4. Bioenergija .....	12
2.5. Ostali obnovljivi izvori energije .....	12
2.6. Čisti izvori energije .....	14
3. Usporedba različitih solarnih energetske sustava .....	15
3.1. Glavna podjela solarnih energetske sustava .....	16
3.2. Prednosti između solarnih energetske sustava .....	19
3.3. Nedostaci između solarnih energetske sustava .....	20
4. Usporedba različitih vjetroturbinskih sustava .....	21
4.1. Glavna podjela vjetroturbinskih sustava .....	22
4.2. Prednosti između vjetroturbinskih sustava .....	25
4.3. Nedostaci između vjetroturbinskih sustava .....	26
5. Usporedba ukupne energetske učinkovitosti obnovljivih izvora energije .....	28
5.1. LCOE .....	28
5.2. Zauzeta Površina .....	29
5.3. LCA .....	29
5.4. Usporedba .....	30
6. Zaključak .....	37
7. Literatura .....	39
8. Popis oznaka i kratica .....	43
9. Ključne riječi .....	43
10. Keywords .....	43
11. Sažetak .....	44
12. Abstract .....	45

## 1. Uvod

Obnovljivi izvori energije, kao što su sunčeva energija, vjetar, hidroenergija i geotermalna energija, pružaju izvore energije koji ne iscrpljuju prirodne resurse prilikom proizvodnje energije. Međutim, kako bi se maksimalno iskoristila energija od obnovljivih izvora, važno je primijeniti koncept njihove energetske učinkovitosti. Energetska učinkovitost obnovljivih izvora energije obuhvaća koncept optimizacije iskorištavanja obnovljivih izvora energije kako bi se postigao maksimalni energetska učinak uz minimalne gubitke. Koncept energetske učinkovitosti sintetizira razmjere između troškova izgradnje postrojenja, troškova goriva po kW, troškova održavanja sustava te ekoloških šteta uzrokovanih operacijom i proizvodnjom sustava s ciljem ostvarivanja održivog i ekonomski prihvatljivog energetskog sustava.

Glavni izazov s kojim se suočavaju obnovljivi izvori energije jest varijabilnost u proizvodnji energije, što ujedno direktno utječe na njihovu energetska učinkovitost i pouzdanost. Spomenuta varijabilnost uglavnom ovisi o vanjskim uvjetima koji su trenutno izvan kontrole čovjeka. Primjer takvih uvjeta su oblaci, brzina vjetra, količina padalina i drugi prirodni faktori. Rezultat nemogućnosti kontroliranja svih uvjeta su fluktuacije u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora.

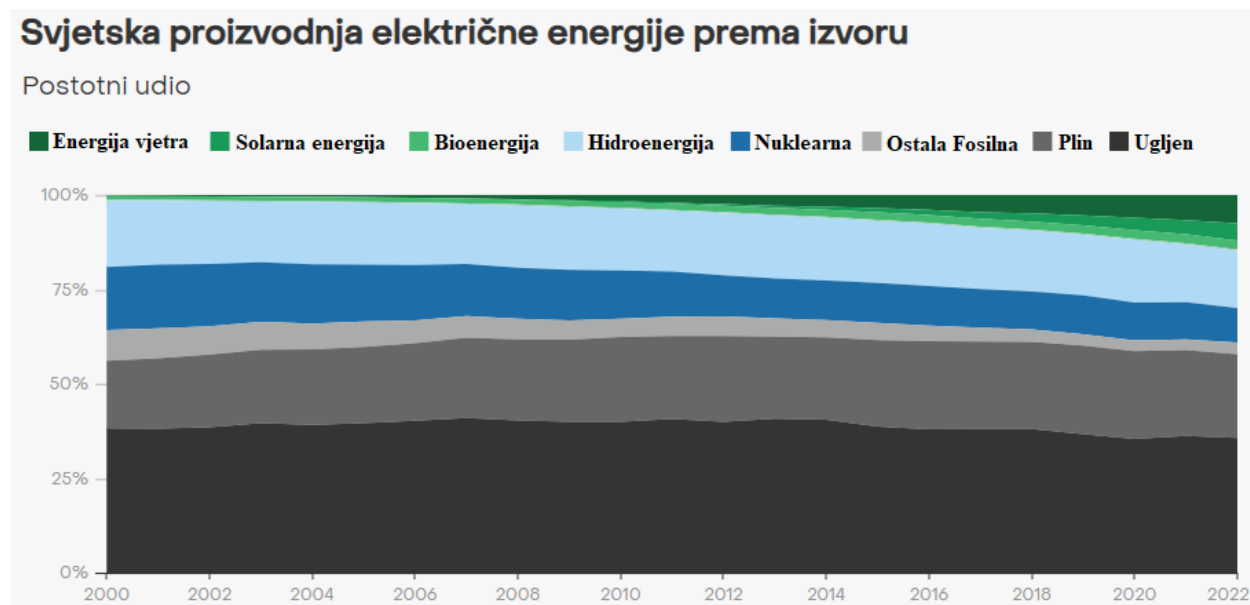
Skladištenje energije predstavlja ključni aspekt u rješavanju problema fluktuacije u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora. S druge strane, takav pristup značajno smanjuje energetska učinkovitost u pogledu cjelokupnog sustava. Skladištenje energije omogućuje akumulaciju viška energije tijekom razdoblja visoke proizvodnje iz obnovljivih izvora te njeno oslobađanje tijekom razdoblja niske proizvodnje ili kompletnog prestanka proizvodnje energije. Na taj način, skladištenje energije djeluje kao sredstvo za izravnavanje fluktuacija u proizvodnji energije. Postoje različite metode skladištenja energije kao što su: baterije, hidro akumulacija, termalno pohranjivanje, komprimirani zrak, vodik i drugo. Svaka metoda skladištenja ima svoje prednosti i ograničenja u pogledu kapaciteta, učinkovitosti, troškova i dostupnosti tehnologija.

Potrebnu količinu energetskog kapaciteta moguće je smanjiti putem prijenosa energije iz regije s trenutno visokom proizvodnjom iz obnovljivih izvora energije u regiju s trenutno niskom proizvodnjom. Međutim, to izaziva niz drugih problema. Neki od problema su gubici energije tijekom prijenosa, povećanje energetske mreže radi povećanog opterećenja te ranjivost u slučaju većih prekida u mreži uslijed prirodnih katastrofa ili terorističkog napada. Cilj ovoga rada je uvid u energetska učinkovitost različitih obnovljivih izvora energije te analiza razlike u njihovoj energetskoj učinkovitosti.



## 2. Obnovljivi izvori energije

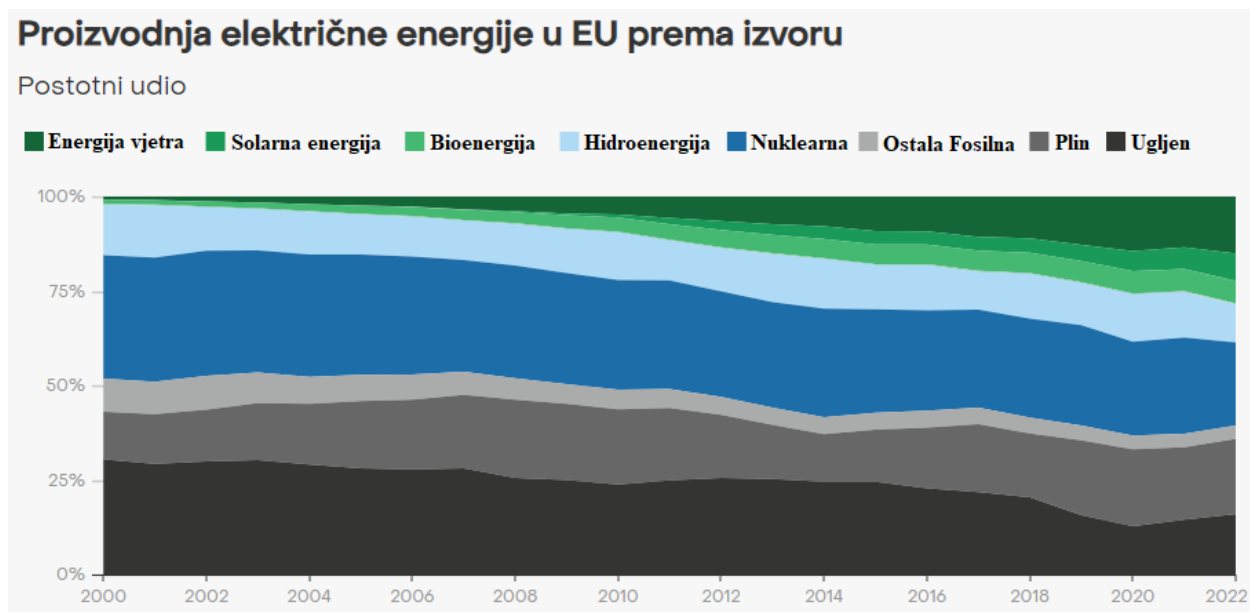
Obnovljivi izvori energije imaju ključnu ulogu u rješavanju problema globalnog zatopljenja i zagađenja okoliša. Na kraju 2022. godine prema [1], udio čistih izvora energije (svi izvori energije koji nisu dobiveni uz pomoć fosilnih goriva) u svjetskoj proizvodnji električne energije iznosio je 38,57% (Slika 2.1.). Udio čistih izvora energije povećao se samo za 0,27% u odnosu na prethodnu godinu.



Slika 2.1. Graf udjela svjetske proizvodnje električne energije [1]

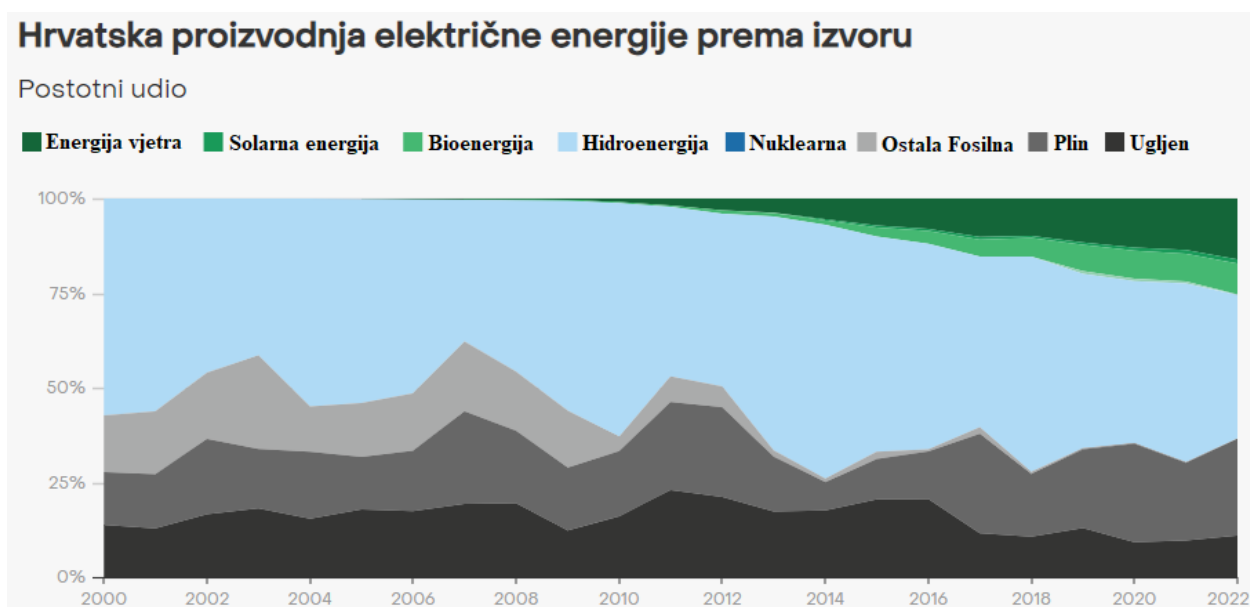
Najveći udio električne energije, prema [1], proizvedene iz obnovljivih izvora čine hidroelektrane s svjetskim udjelom od 15,16% (Slika 2.1.). Hidroenergija predstavlja prvi oblik električne energije dobiven iz obnovljivih izvora. Međutim, zabrinjavajući je trend smanjenja udjela električne energije proizvedene hidroelektranama i nuklearnim elektranama, što se očitava u padu njihovog zajedničkog svjetskog udjela od 0,79% u 2022. godini u odnosu na prethodnu godinu. Ovaj trend nije povoljan u borbi protiv smanjenja udjela fosilnih goriva, s obzirom na to da fotonaponski sustavi i vjetroelektrane trenutno sami ne mogu zamijeniti fosilna goriva. Razlog toga je primarno radi njihove fluktuacije u proizvodnji električne energije, što bi zahtijevalo ogromne sustave za skladištenje energije te značajno povećanje količine dalekovoda radi prijenosa energije iz regije u regiju. [1]

U usporedbi sa svjetskom proizvodnjom električne energije, možemo uočiti da je udio čistih izvora električne energije unutar Europske unije prema [1] iznosio 60,55% (Slika 2.2.) te je ujedno pao za 2,2% u odnosu na prethodnu godinu. Taj pad je zabrinjavajući.



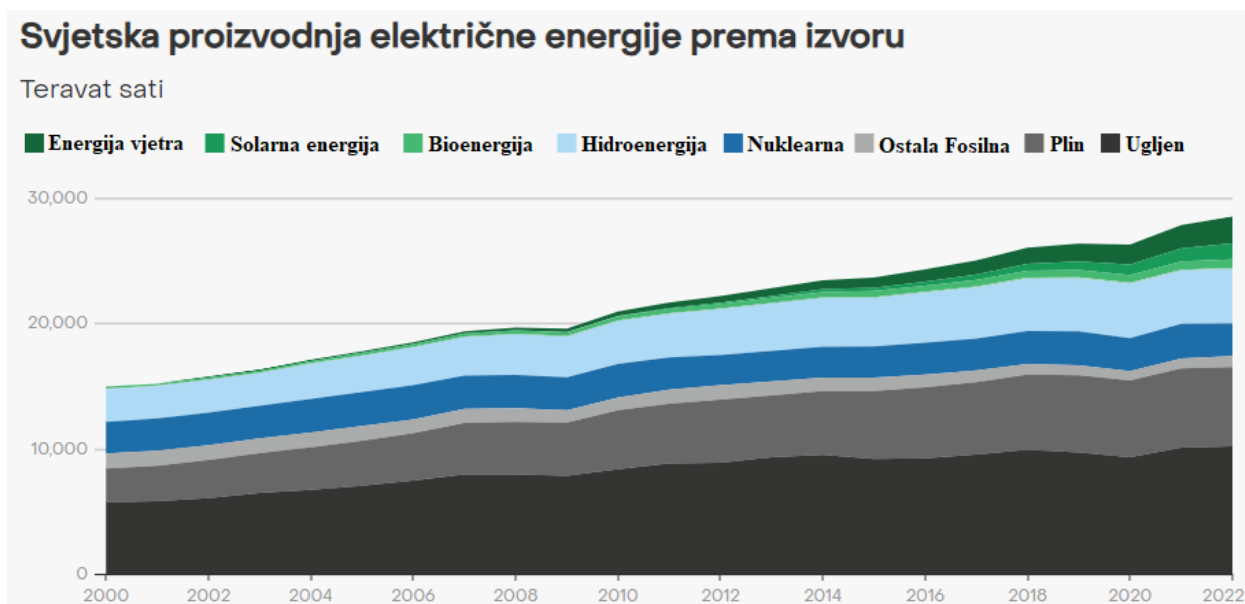
Slika 2.2. Graf udjela proizvodnje električne energije unutar Europske Unije [1]

Udio čistih izvora električne energije unutar Hrvatskoj iznosio je 63,38% (Slika 2.3.) te je udio pao za 6.46% u odnosu na prethodnu godinu. [1]



Slika 2.3. Graf udjela proizvodnje električne energije unutar Hrvatske [1]

Svjetska potražnja za električnom energijom kontinuirano raste, s prosječnim godišnjim povećanjem od ~2,5% (Slika 2.4.). Očekuje se da će potražnja za električnom energijom biti dodatno povećana prelaskom prijevoznih sredstava, posebno automobila, s fosilnih goriva na električni pogon. [1]

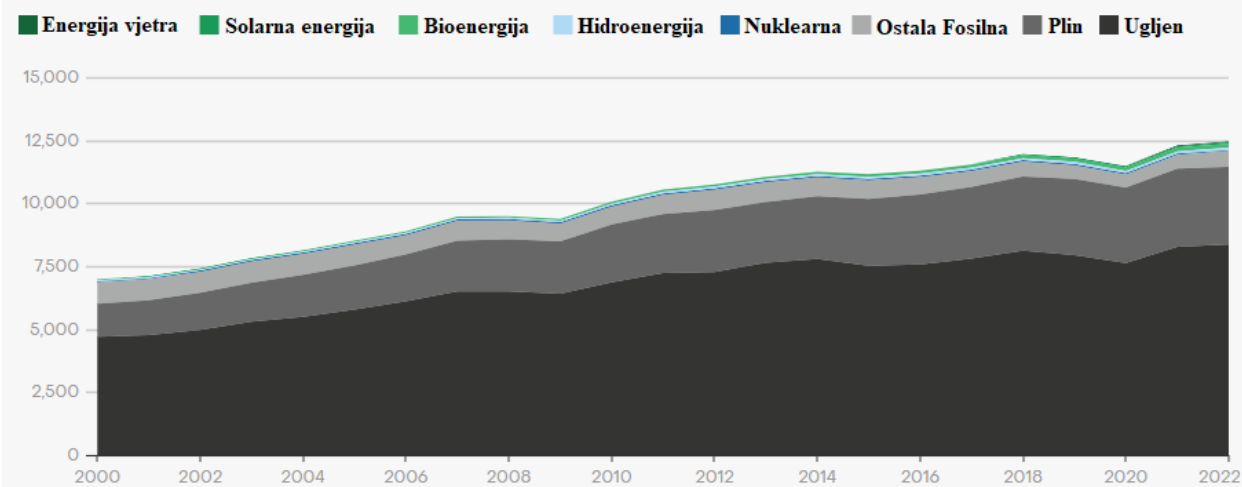


Slika 2.4. Graf svjetske proizvodnje električne energije u TWh [1]

Nažalost, količina izgaranja fosilnih goriva na globalnoj razini i dalje raste. (Slika 2.5.). Ova činjenica ukazuje na potrebu za hitnim i odlučnijim djelovanjem kako bi se preokrenuo trend rasta emisija stakleničkih plinova. Povećanje korištenja čistih izvora energije i smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima ključni su za postizanje održivog energetskeg sustava i zaštite našeg okoliša.

## Emisije svjetskog elektroenergetskog sektora prema izvoru

Megatona CO<sub>2</sub>

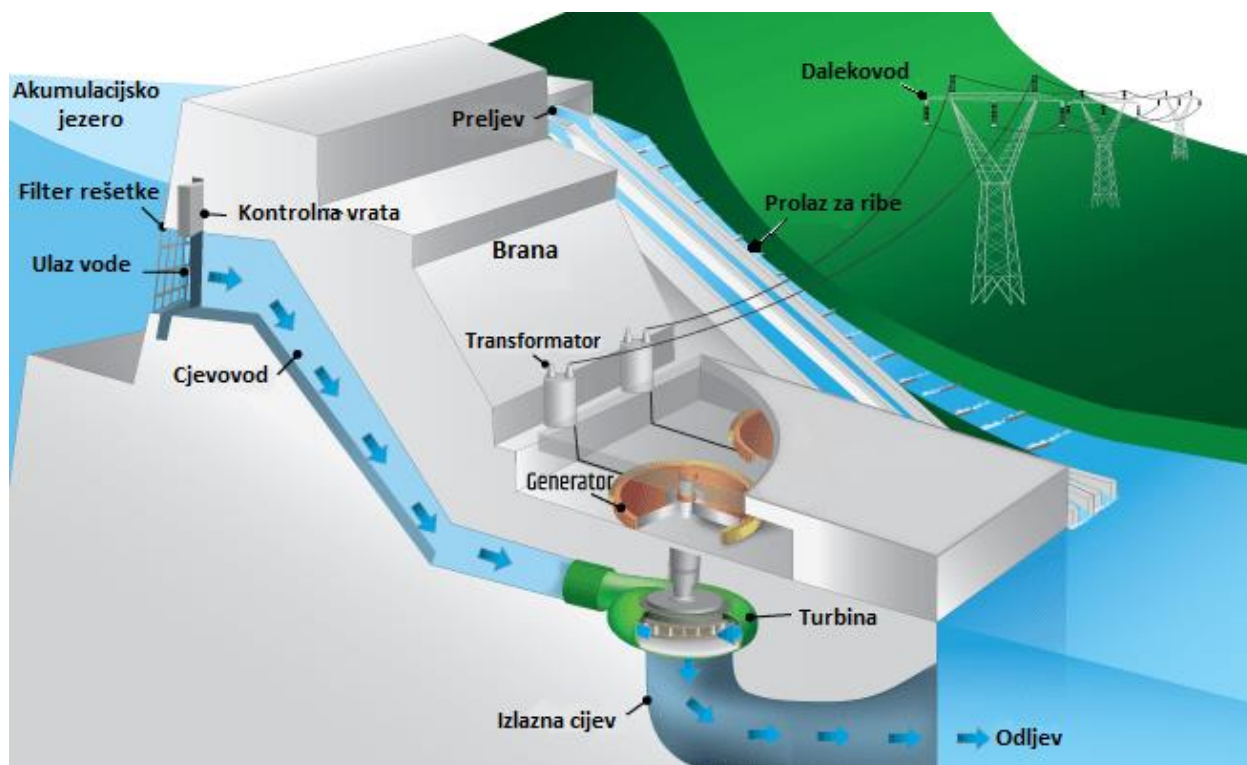


Slika 2.5. Graf svjetske emisije megatona CO<sub>2</sub> energetskega sektora [1]

Održiva tranzicija prema energetskega sustavu s manjim udjelom fosilnih goriva zahtijeva sinergiju i koordinirane napore između čistih izvora energije. Samo njihovim integriranim pristupom možemo postići ciljeve u borbi protiv klimatskih promjena te postići održivi i pouzdani energetskega sustav.

## 2.1. Hidroenergija

Hidroenergetski sustavi koriste energiju vode za generiranje električne energije. Hidroelektrane koriste snagu i potencijal vode koja se akumulira u akumulacijskom jezeru ili regulacijskom bazenu (Slika 2.6.). Proces proizvodnje električne energije započinje otvaranjem ventila koji omogućava kontrolirani protok vode iz akumulacijskog jezera. Voda se potom ispušta sa veće visine nizvodno, stvarajući kinetičku energiju koja se koristi za pokretanje turbine. Turbina je ključni element hidroelektrane te pretvara kinetičku energiju vode u mehaničku energiju rotacije. Rotacijom turbine pokreće se generator, koji je spojen na turbinu, te generira električnu energiju putem elektromagnetske indukcije. Generirana električna energija se zatim prenosi kroz električne vodove i transformatore, do krajnjega potrošača. [2]

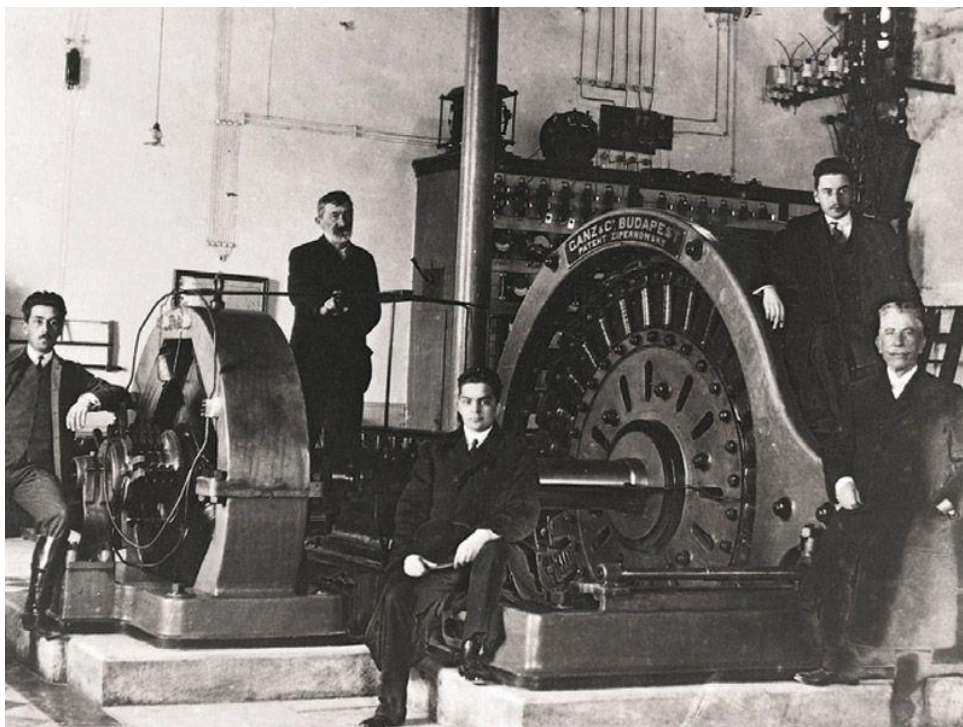


Slika 2.6. Slika presjeka hidroelektrane [2]

Hidroelektrane se smatraju jednim od najučinkovitijih i najpouzdanijih obnovljivih izvora energije sa najvećim industrijskim prosjekom energetske efikasnosti od oko 90%. [2] Njihova prednost leži u činjenici da voda, kao primarni izvor energije, ima konstantan ciklus opskrbe i visoku potencijalnu snagu. Hidroelektrane su ekološki prihvatljive jer prilikom generiranja električne energije ne proizvode stakleničke plinove, no stvaranjem akumulacijskog jezera uništava se postojeći ekosistem na tom području. Razvoj hidroelektrana nastavlja se kako bi se poboljšala energetska učinkovitost, povećava ekonomičnost i smanjio utjecaj na okoliš.

U 2022. godini hidroelektrana na svijetu sa najvećim instaliranim kapacitetom je „Three Gorges“ hidroelektrana u Kini na rijeci Jangce sa 22.500.000 kW instaliranim kapacitetom. [3] Na kraju 2022. godine, udio svjetske električne energije proizvedene uz pomoć hidroelektrana iznosio je 15,16%, što predstavlja blagi pad za 0,09% u odnosu na prethodnu godinu. [1]

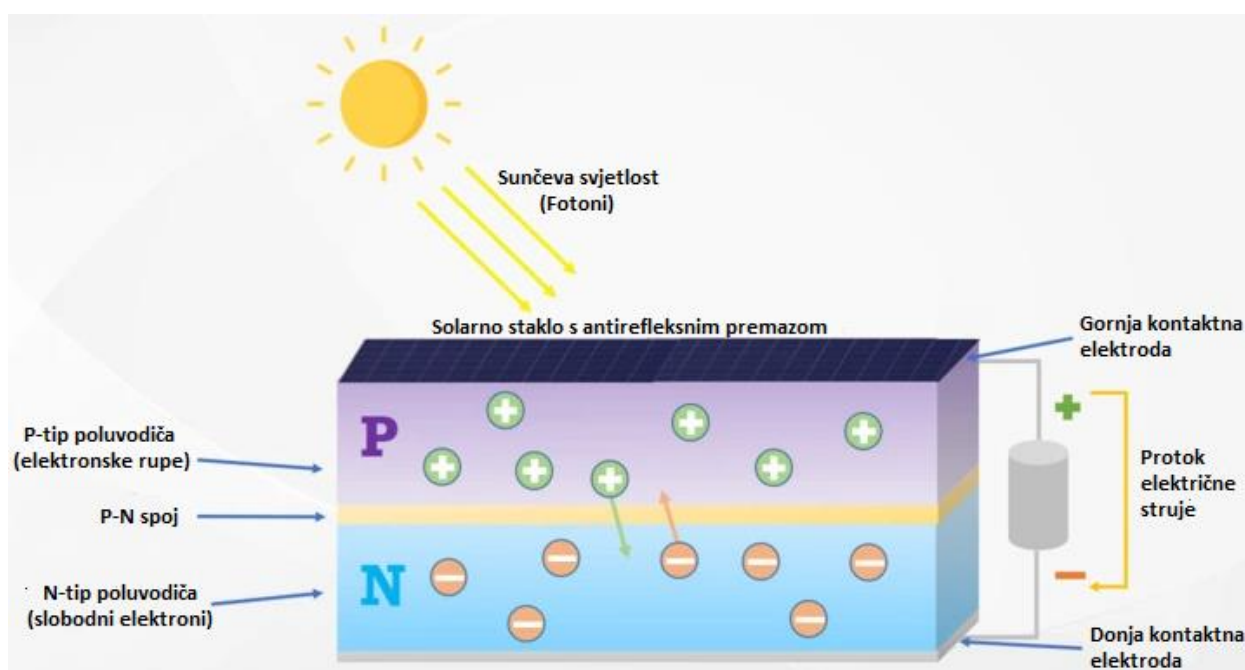
Prva hidroelektrana "Vulcan Street Plant" izgrađena je 1882. godine u SAD-u s instaliranim kapacitetom od 12,5 kW, istosmjerne struje. [4] Prva hidroelektrana u Europi je Jaruga (Slika 2.7.), izgrađena 1895. godine u Hrvatskoj na rijeci Krki, s ukupnim instaliranim kapacitetom od 1100 kW, izmjenične struje. [5]



*Slika 2.7. Slika znanstvenika pored jednog od generatora u Jarugi [5]*

## 2.2. Solarna energija

Solarni energetska sustavi koriste energiju sunca odnosno fotona kako bi proizveli električnu energiju. Tehnologije koje koriste fotonaponske ćelije mogu direktno pretvarati sunčevu energiju u električnu energiju (Slika 2.8.). Fotonaponske ćelije se sastoje od poluvodičkih materijala koji posjeduju svojstvo generiranja električne struje pod utjecajem sunčevog svjetla. Kada sunčeva svjetlost dopre do fotonaponske ćelije, fotoni iz svjetlosti sudaraju se s atomima u poluvodiču izbacujući elektrone iz njihovih atoma i time stvaraju protok električne struje. Ovaj proces se naziva fotoelektrični efekt, a temelji se na sposobnosti materijala da apsorbira fotone i generira slobodne elektrone. Električni tok koji se generira unutar fotonaponske ćelija se potom vodi prema električnom krugu i koristi se za napajanje električnih uređaja ili punjenje baterija. [6]

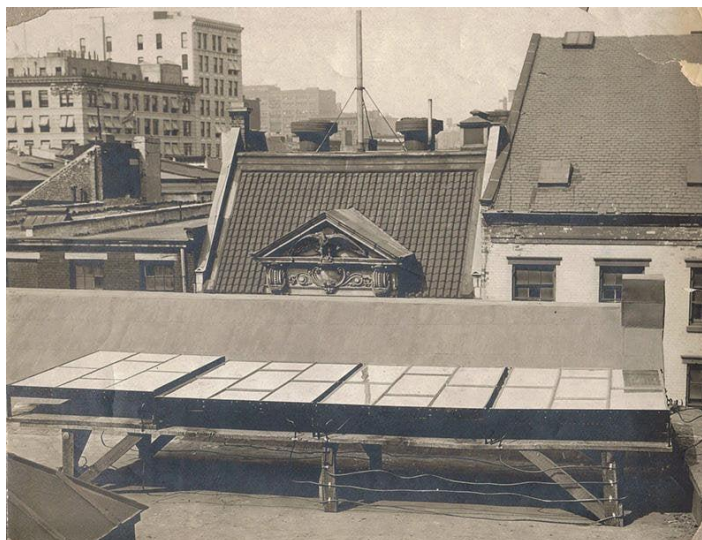


Slika 2.8. Slika procesa generiranja električne energije u fotonaponskom panelu [6]

Fotonaponski sustavi se smatraju ključnom tehnologijom za proizvodnju čiste i obnovljive električne energije. Napredak u materijalima i tehnologiji fotonaponskih ćelija, kao i poboljšanjem efikasnosti pretvorbe sunčeve energije, kontinuirano doprinose povećanju njihove energetske učinkovitosti. Integracija fotonaponskih sustava u energetska mrežu igra ključnu ulogu u postizanju održivih energetska ciljeva.

Na kraju 2022. godine, udio svjetske električne energije proizvedene putem solarnih energetska sustava iznosio je 4,52% te je porastao za 0,78% naprema prethodnoj godini. [1]

Prvi solarni paneli izgrađeni su 1883. godine u SAD-u te su imali energetska efikasnost od samo 1%. Komercijalna instalacija prvog solarnog panela na krov, dogodila se 1884. godine (Slika 2.9.). Solarni paneli su tek postali praktični za komercijalnu upotrebu 1941. godine, kada su postigli energetska efikasnost od 5%. Ovo dostignuće je označilo ključni preokret u razvoju solarnih tehnologija i otvorilo put za njihovu širu primjenu. [7]



Slika 2.9. Slika prvog solarnog panela instaliranog na krovu [7]

U 2022. godini industrijski prosjek energetske efikasnosti fotonaponskih solarnih ćelija iznosi oko 19%, dok najefikasniji komercijalno dostupni solarni panel postiže efikasnost od oko 23,6%. U laboratorijskim uvjetima najviša postignuta efikasnost solarnog panela iznosi 47,1%. Teoretski maksimalna moguća energetska efikasnost solarnih panela na Zemlji iznosi 68,7% dok je maksimalna teoretska energetska efikasnost solarnih panela 86,8% pod najboljim uvjetima. Energetska efikasnost solarnih panela može se izračunati prema sljedećoj formuli: (2.1) [8]

$$Efikasnost (\%) = \frac{P_{Max}}{(P \times STC)} \times 100 \quad (2.1)$$

Gdje je:

$P_{Max}$  - maksimalni instalirani kapacitet solarnog panela u vatima (W)

$P$  - površina solarnog panela izražena u kvadratnim metrima ( $m^2$ )

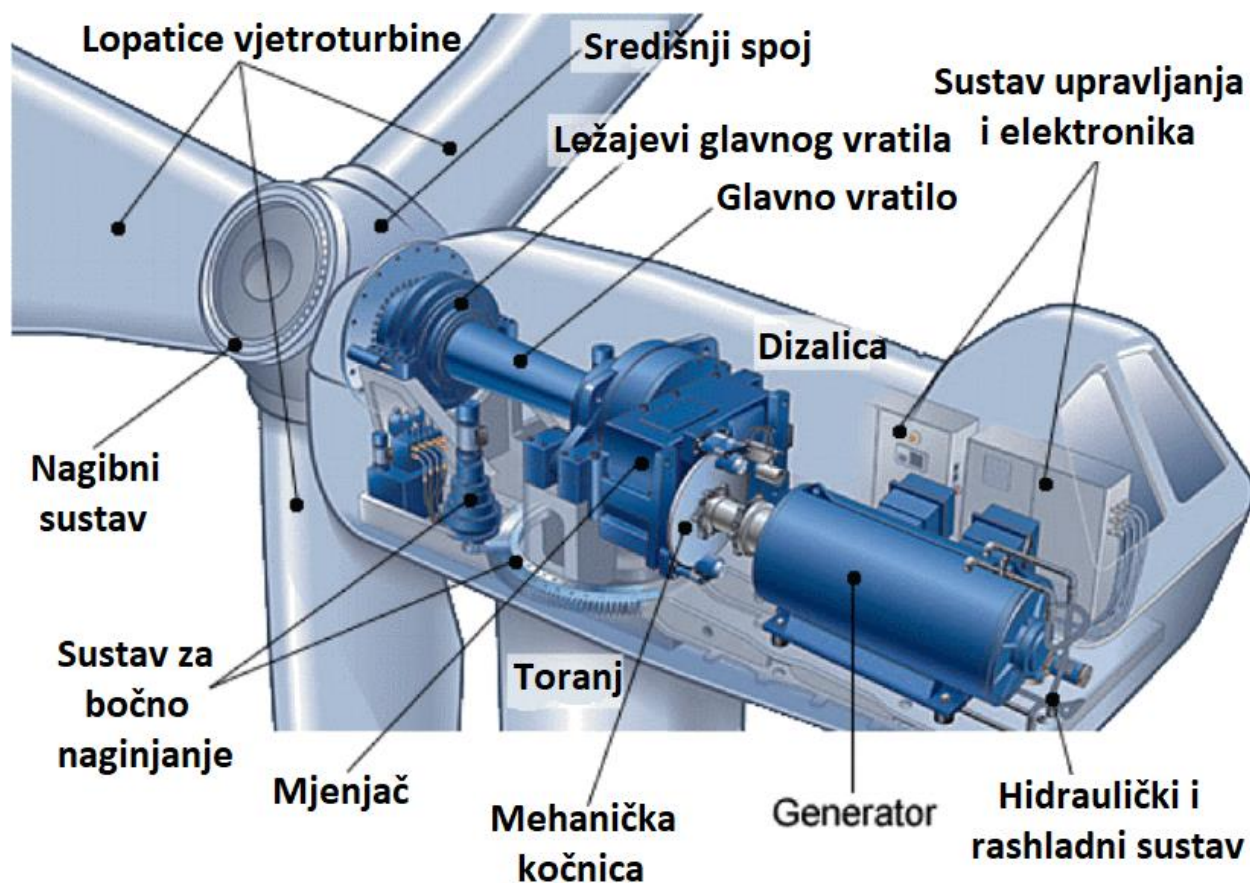
STC - osvjetljenost izraženu u vatima po kvadratnom metru ( $W/m^2$ )

Kada pomnožimo površinu solarnog panela s vrijednošću STC, dobivamo ukupnu energiju koju solarni panel može primiti. Ova formula je ključna za analizu i procjenu energetske učinkovitosti solarnih panela. [8]



### 2.3. Energija vjetra

Vjetroelektrane su sustavi koji iskorištavaju kinetičku energiju vjetra za generiranje električne energije. Kroz mehaničku interakciju s vjetrom vjetroturbine pretvaraju kinetičku energiju u rotacijsku energiju lopatica (*Slika 2.10.*). Rotacija lopatica pokreće generator koji generira električnu energiju putem induciranja struje u elektromagnetskom polju. [9]

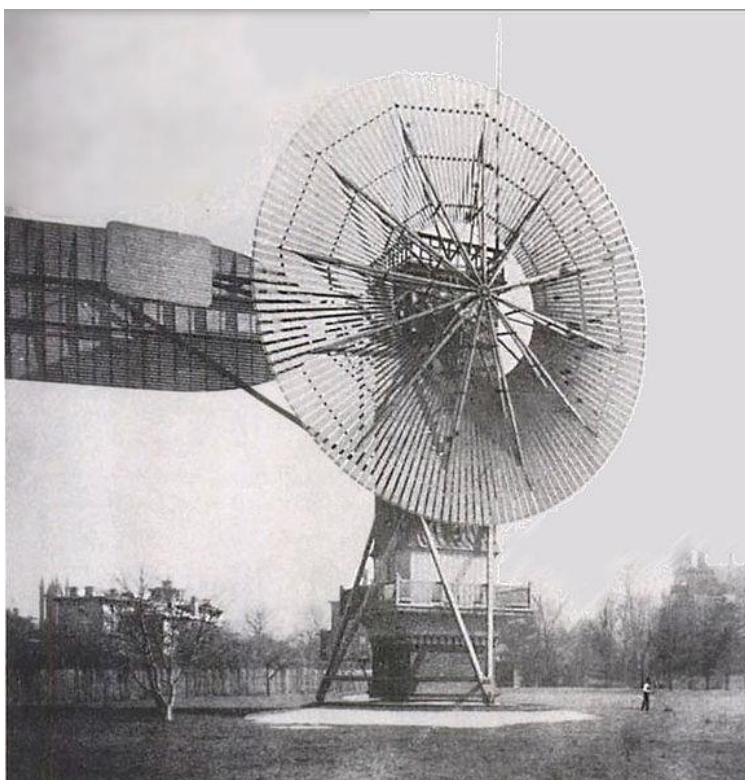


*Slika 2.10. Presjek standardne vjetroturbine [9]*

Energetska efikasnost vjetroturbina izražava se omjerom proizvedene električne energije i raspoložive snage vjetra. Područja s jakim i stabilnim vjetrovima idealna su za smještaj vjetroturbina radi maksimalnog iskorištavanja energije vjetra. Kvalitetna analiza vjetrova i izbor lokacije ključni su faktori za optimizaciju energetske učinkovitosti vjetroturbinskih sustava. Daljnji napredak u tehnologiji vjetroturbina, kao i kontinuirana istraživanja, povećati će njihovu energetska efikasnost, smanjiti troškove i omogućiti širu primjenu. To će ujedno omogućiti njihovu veću zastupljenost u udjelu proizvedene električne energije.

U 2022. godini, najjače vjetroturbine imaju instaliranu snagu od 15.000 kW. [10] Industrijski prosjek energetske efikasnosti vjetroturbina u tipičnim uvjetima vjetra kreće se od 25% do 45%, s teorijskim maksimumom od 59,3% iskoristivosti snage vjetra. Kako bismo dobili trenutnu energetska efikasnost vjetroturbine, dijelimo električnu snagu koju pretvara vjetroturbina s trenutno raspoloživom snagom vjetra. Na kraju 2022. godine udio svjetske električne energije proizvedene uz pomoć vjetroturbina iznosio je 7,52% te je porastao za 0,88% u odnosu na prethodnu godinu. [1]

Prva vjetroturbina koja je proizvodila električnu energiju izgrađena je 1887. godine u Škotskoj. Međutim, zbog lošeg dizajna, ta vjetroturbina je imala vrlo nisku učinkovitost te je proizvodila vrlo malu količinu električne energije. Istovremeno, u SAD-u razvijala se prva praktična vjetroturbina (*Slika 2.11.*) koja je završena sa izgradnjom 1888. godine. Ta vjetroturbina bila znatno naprednija te je imala instalirani kapacitet od 12 kW. [11]



*Slika 2.11. Slika prve praktične vjetrenjače [11]*

## **2.4. Bioenergija**

Bioenergija dobiva se uz pomoć bioloških tvari kao što su biljke i životinje. Proces proizvodnje biogoriva uključuje pretvaranje organske materije u tekuće ili plinovito gorivo koje se može koristiti kao zamjena za fosilna goriva u transportu i industriji. [12] Prilikom prerade biogoriva mogu se ispuštati određene količine stakleničkih plinova, ali te emisije su obično znatno manje u usporedbi s fosilnim gorivima. Procesi poput fermentacije, kompostiranja i anaerobne digestije koji se mogu koristiti u postupku proizvodnje biogoriva rezultiraju emisijom plinova poput metana i ugljičnog dioksida (u nastavku CO<sub>2</sub>).

Jedan od biogoriva je plin biometan koji se dobiva preradom organskog otpada kao što su ostaci od prerade drva, uzgoja voća i povrća. Taj biootpad prerađuje se uz pomoć anaerobne digestije, odnosno organski otpad se preradi te položi u zatvorenu komoru bez pristupa zraka sa uvjetima povoljnim za razvoj bakterija koje razgrađuju organski otpad i proizvode metan. Taj metan se potom sakuplja te se koristi u elektranama na plin ili vozilima na plin. Također, ostatak biomase prilikom prerade se može koristiti kao kompost za uzgajanje hrane.

Pod biogoriva, također, spadaju drvene palete dobivene sječom i preradom drva. One se mogu koristiti kao dodatak elektranama na ugljen radi smanjenja emisija stakleničkih plinova. Iako su drvene palete klasificirane kao obnovljivi izvor energije, mnogi se znanstvenici zalažu protiv njih, primarno radi kršenja prirodnih šuma te ispuštanjem CO<sub>2</sub> prilikom izgaranja. Prema istraživanjima [12], drva brzoga rasta koja se najčešće koriste za proizvodnju drvenih paleta, upijaju manje CO<sub>2</sub> od prirodnih šume te njihovim izgaranjem se proizvodi više stakleničkih plinova nego oni upiju nazad. Uz to, prirodno apsorpiranje CO<sub>2</sub> je vrlo dugotrajan proces. Na kraju 2022. godine, udio svjetske električne energije proizveden uz pomoć biogoriva iznosi 2,38% te se nije promijenio u odnosu na prethodnu godinu. [1]

## **2.5. Ostali obnovljivi izvori energije**

Ostali obnovljivi izvori energije su nedovoljno zastupljeni te njihov ukupan doprinos globalnoj proizvodnji električne energije ne prelazi 1%. Međutim, neki od navedenih obnovljivih izvora energije su donekle implementirani, što nam omogućuje pristup podacima za potrebe ovog istraživanja te njihove usporedbe sa ostalim obnovljivim izvorima energije.

### 2.5.1. Energija mora

Obnovljivi izvori energije dobiveni iz mora, poput energije valova, morskih struja i energije plime i oseke predstavljaju potencijalno značajan izvor generiranja električne energije. Postoji nekoliko načina dobivanja energije iz mora koje se vrši preko specijaliziranih elektrana. Postoje elektrane na valove, elektrane na morske struje te elektrane na plimu i oseku. Elektrane na valove koriste oscilacije morske površine za pokretanje specijalnih uređaja poput plutajućih platformi koji pretvaraju kinetičku energiju valova u električnu energiju. Elektrane na morske struje koriste strujanje morske vode za pogon turbina koje generiraju električnu energiju. Elektrane na plimu i oseku koriste geografski povoljna područja, kao uvale, kako bi se na tom području izgradile brane koje bi iskoristile pad i porast razine mora tokom plime i oseke kako bi se generirala električna energija.

Obnovljivi izvori energije dobiveni iz mora posjeduju niz prednosti, uključujući predvidljivost i stabilnost. Periodičnost plima i oseka te konstantnost morskih struja omogućuje pouzdan obnovljiv izvor električne energije. Unatoč svojim prednostima, ova tehnologija se još uvijek razvija i unapređuje. Potrebna su daljnja istraživanja, razvoj te optimizacija procesa kako bi se postigla veća energetska učinkovitost i komercijalna izvedivost ovih sustava. Sveukupno, obnovljivi izvori energije dobiveni iz mora imaju potencijal za pružanje održivog, predvidljivog i čistog izvora energije. [13]

### 2.5.2. Geotermalna energija

Geotermalna energija predstavlja sustave koji iskorištavaju toplinu iz unutrašnjosti Zemlje u svrhu generiranja električne energije. Proces proizvodnje električne energije u geotermalnim elektranama uključuje bušenje dubokih rupa kako bi se omogućio pristup vrućim podzemnim stijenama ili geotermalnim izvorima. Toplina dobivena iz tih izvora prenosi se putem radne tekućine koja cirkulira u sustavu. Rana tekućina zagrijava vodu koja prolazi kroz ciklus isparavanja i kondenzacije pri čemu se stvara para koja okreće turbogenerator koji proizvodi električnu energiju. Nakon prolaska kroz turbogenerator, para se kondenzira i vraća natrag u sustav radi ponovne upotrebe. Ovaj termodinamički ciklus omogućuje geotermalnim elektranama kontinuirano generiranje električne energije koristeći toplinu iz unutrašnjosti Zemljine kore.

Geotermalne elektrane predstavljaju stabilan i održiv izvor električne energije jer koriste prirodnu toplinu koja se neprestano obnavlja. Osim proizvodnje električne energije, geotermalne elektrane mogu pružiti i dodatne pogodnosti kao što su grijanje i hlađenje domova. Daljnji razvoj tehnologija za geotermalnu energiju, istraživanje novih geotermalnih izvora te poboljšanje energetske efikasnosti procesa ključni su za maksimiziranje energetske učinkovitosti geotermalnih elektrana te njihovog potencijala kao čistog i održivog izvora energije. [14]

U svjetskim razmjerima, sve geotermalne elektrane zajedno proizvode samo oko 17 GW električne energije, što predstavlja tek oko 0,0008% udjela globalne proizvodnje električne energije. Prema procjenama [15], potencijalna maksimalna iskoristivost geotermalne energije, s poznatim povoljnim izvorima, procjenjuje se na otprilike 10% udjela trenutne svjetske potražnje za električnom energijom. Ova procjena uzima u obzir dostupnost geotermalnih resursa na određenim lokacijama te tehničke mogućnosti.

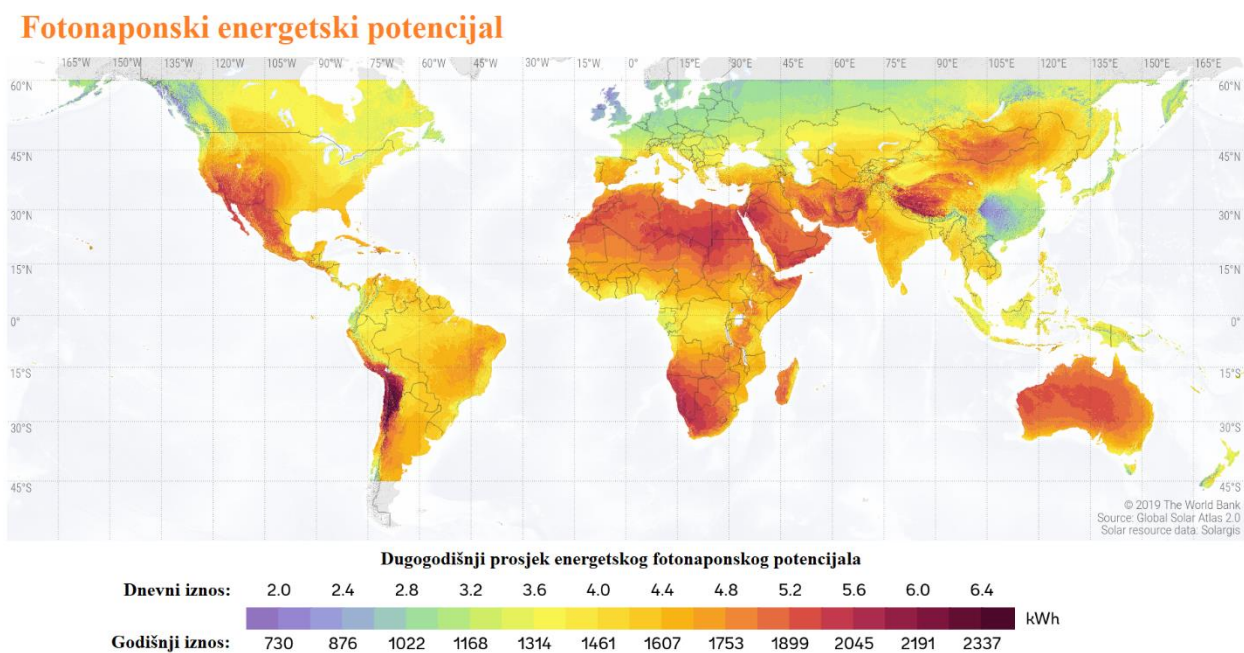
## **2.6. Čisti izvori energije**

Čisti izvori energije kao što su nuklearna i fuzijska energija, se ne mogu izravno svrstati među obnovljive izvore energije. Razlog toga je potrošnja prirodnih resursa za proizvodnju energije. Takva vrsta energije igra ključnu ulogu u smanjenju ispuštanja stakleničkih plinova u procesu proizvodnje energije te u potpunom zapostavljanju fosilnih goriva.

Nuklearna reaktori generiraju energiju kroz proces nuklearne fisije. Iako je nuklearna energija kontroverzna zbog pitanja sigurnosti i upravljanja nuklearnim otpadom, njezin doprinos u smanjenju emisija stakleničkih plinova i ovisnosti o fosilnim gorivima je važan. Fuzijski reaktori koji se temelje na procesu nuklearne fuzije, predstavljaju potencijalno neograničen izvor energije. Trenutno su u procesu eksperimentiranja i optimiziranja [15]. U trenutku kada fuzijski reaktori uspiju pouzdano i konzistentno proizvesti više od uložene energije, to će označiti revolucionarni korak prema održivoj i sigurnoj energetskej budućnosti.

### 3. Usporedba različitih solarnih energetskih sustava

Energetska učinkovitost solarnih energetskih sustava povezana je sa količinom primljenih fotona i intenzitetom sunčevog zračenja koju regija prima. Općenito, možemo pretpostaviti da će solarni energetski sustavi imati veću energetska učinkovitost što se bliži ekvatoru. No to još ovisi o mnogo drugih faktora kao što su: nadmorska visina, broj sunčanih dana u godini te o drugim čimbenicima. To se može uočiti na sljedećoj *Slici 3.1*.



*Slika 3.1. Karta maksimalnog eneretskog potencijala fotonaponskih sustava [16]*

Važno je uzeti u obzir i druge faktore koji mogu utjecati na energetska učinkovitost solarnih energetskih sustava kao što su: korištena tehnologija, orijentacija panela ili zrcala, stanje površine panela ili zrcala i prisutnost sjene od okolnih objekta. Tehnološki napredak u području solarnih energetskih sustava doprinijeti će daljnjem povećanju njihove energetske učinkovitosti.

### 3.1. Glavna podjela solarnih energetskih sustava

#### 3.1.1. Solarne elektrane

Takozvane „solarne farme“ koriste brojne fotonaponske solarne panele (*Slika 3.3.*) koji pretežno imaju sposobnost rotacije oko jedne osi za 40-55° ili su fiksirani. Iako postoje solarni paneli rotacije oko dvije te ujedno imaju veću energetske efikasnost, takvi sustavi obično zahtijevaju veću početnu investiciju, imaju veće troškove održavanja, zahtijevaju veću površinu i imaju kraći životni vijek zbog povećane složenosti.

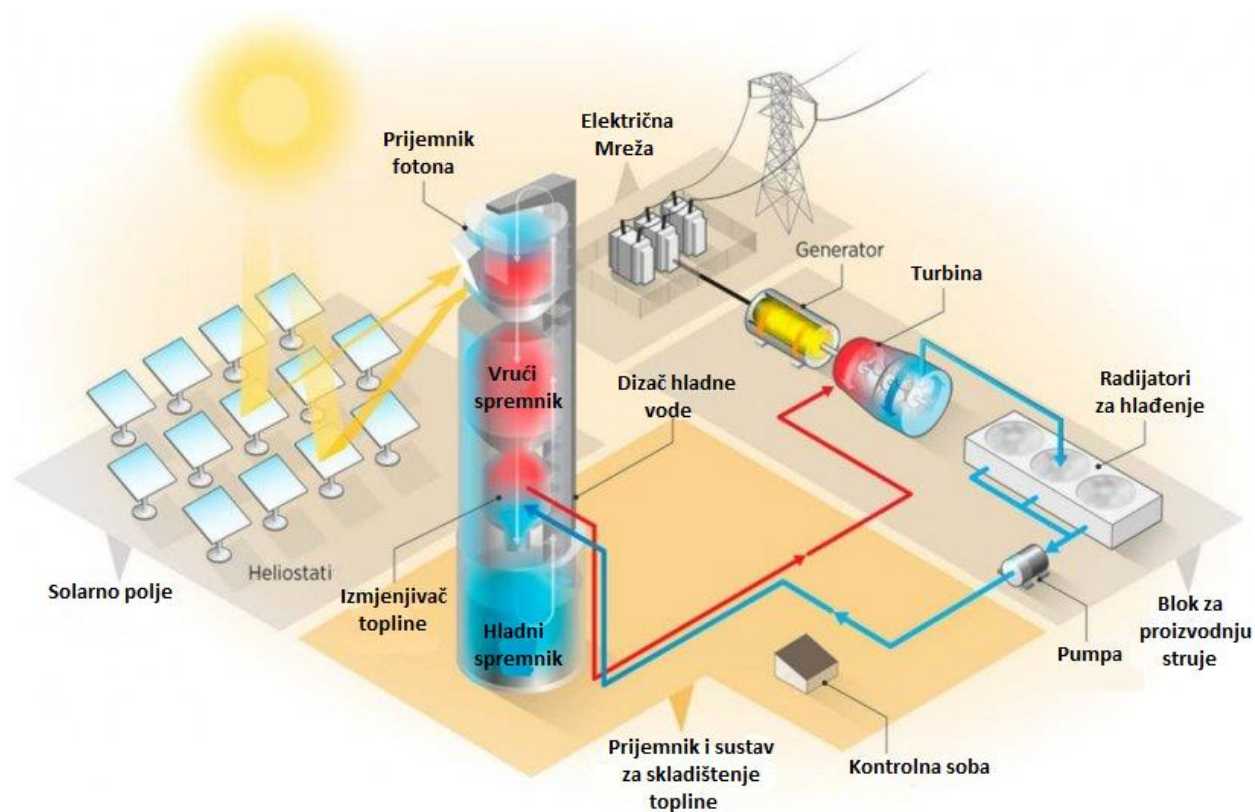


*Slika 3.3. Slika jedne od najvećih solarnih farma na svijetu [17]*

Monokristalni i polikristalni solarni paneli su dva najčešća tipa fotonaponskih solarnih panela. Oba tipa panela koriste fotonaponske ćelije sačinjene od silicija kako bi generirali električnu energiju. Glavna razlika između njih leži u kristalnoj konfiguraciji silicija. Monokristalni solarni paneli koriste jedan kristal silicija za svaku fotonaponsku ćeliju te imaju karakterističnu crnu boju panela. S druge strane, poli-kristalni solarni paneli koriste više fragmenata kristala silicija koji se spajaju u procesu proizvodnje, to rezultira prepoznatljivom plavom bojom panela. Ova razlika u konfiguraciji kristala utječe na njihovu energetske efikasnost i cijenu. [18]

### 3.1.2. Solarni tornjevi

Solarni tornjevi kao energetske sustave koriste koncentrirana zrcala, odnosno takozvanih heliostata, uz pomoć kojih usmjeravaju koncentriranu sunčevu energiju (*Slika 3.4.*) na isto mjesto. To omogućuje visoku koncentraciju sunčeve energije na malom području, što rezultira efikasnom pretvaranju sunčeve svjetlosti u električnu energiju. Kako ovi sustavi izravno ne pretvaraju sunčevu energiju u električnu energiju, nego se oslanjaju na turbinu, oni ne spadaju pod fotonaponske sustave. [19]



*Slika 3.4. Vizualni prikaz procesa proizvodnje električne energije u solarnom tornju [19]*

Današnji solarni tornjevi ostvaruju energetske efikasnost u rasponu od 23% do 35% te djeluju pri temperaturama između 250°C i 565°C. Sustavi koji rade na višim temperaturama, od 550°C do 750°C, postižu efikasnost od oko 30%. S obzirom na varijacije sunčeve svjetlosti, prosječna postignuta efikasnost pretvorbe u električnu energiju obično je niža od maksimalne energetske efikasnosti. Neto godišnja efikasnost pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju varira između 7% i 20%. [20]



### 3.1.3. Krovni solarni paneli

Krovni solarni paneli kao fotonaponski sustavi nalaze se na krovovima različitih objekata kao što su kuće, zgrade i tvornice. Uobičajeno su postavljeni izravno na krov ili integrirani u samu krovnu konstrukciju, što smanjuje njihovu energetska efikasnost u usporedbi s fotonaponskim panelima koji koriste pomične solarne panele za održavanje optimalnog kuta izlaganja suncu. [21]



*Slika 3.5. Slika fiksnih krovnih solarnih panela [21]*

Solarni paneli s mogućnošću okretanja oko jedne osi ostvaruju značajno veću energetska efikasnost od fiksno postavljenih solarnih panela, s povećanjem od otprilike 32%. S druge strane, solarni paneli koji se mogu okretati oko dvije osi ostvaruju još veću energetska efikasnost u usporedbi s fiksnim solarnim panelima, s povećanjem od otprilike 47%. Mogućnosti okretanja solarnih panela dovodi do povećanja kompleksnosti sustava, kao i povećanja troškova sustava i održavanja, dok istovremeno smanjuje očekivani životni vijek. Dugoročno, pomični solarni paneli imaju veću energetska učinkovitost od fiksnih radi smanjenja fluktuacije u proizvodnji energije kroz dan, što ujedno smanjuje potrebu za većim kapacitetom baterija. [22]

## **3.2. Prednosti između solarnih energetske sustava**

### **3.2.1. Prednosti solarnih elektrana**

Solarne elektrane se sastoje od modularnih solarnih ćelija, što im omogućuje brzu instalaciju bez potrebe za složenijim pojedinačnim sustavima koji bi zahtijevali znatno više vremena.

Radi svoje modularnosti, solarne elektrane mogu se postupno povećavati te imaju vrlo nisku cijenu radi mogućnosti masovne proizvodnje solarnih panela.

Solarne elektrane često koriste pomične solarne ćelije oko jedne osi koje kontinuirano prilagođavaju kut izloženosti sunčevoj svjetlosti. To rezultira većom energetske efikasnošću i smanjenom fluktuacijom u proizvodnji električne energije.

### **3.2.2. Prednosti solarnih tornjeva**

Solarni tornjevi koriste tehnologiju pohranjivanja topline koja omogućuje proizvodnju električne energije i nakon zalaska sunca. Topla radna tekućina se pohranjuje u toplinskim spremnicima te se naknadno koristiti, što rezultira još manjom fluktuacijom u proizvodnji električne energije.

### **3.2.3. Prednosti krovnih solarnih panela**

Solarni paneli na krovovima omogućuju proizvodnju vlastite električne energije te s time dugoročno smanjuju troškove električne energije i osiguravaju vlastiti izvor električne energije pri padu energetske mreže.

Smanjuju se gubici u prijenosu električne energije i opterećenju energetske mreže jer su pozicionirani odmah do potrošača. To ujedno povećava otpornost energetske mreže na prekide u mreži jer se uz pomoć njih može napajati energetska mreža.

Postavljanje solarnih panela na krovove omogućuje korištenje neiskorištenog prostorima na krovovima objekata za proizvodnju energije što ujedno smanjuje potrebu za uništavanje prirodnih površina u usporedbi sa drugim solarnim energetske sustavima.

Krovni solarni paneli imaju minimalni utjecaja na okoliš i ekosustav radi njihove instalacije na krovovima za razliku od drugih solarnih energetske sustava koji imaju veliki utjecaj na prirodu radi potrebe za velikim površinama.

### **3.3. Nedostaci između solarnih energetske sustava**

#### **3.3.1. Nedostaci solarnih elektrana**

Solarne elektrane zahtijevaju znatnu površinu. To rezultira potencijalnom degradacijom ekosustava i smanjenjem prirodne vegetacije. Iz toga razloga važan je pažljivi odabir lokacije solarnih elektrana kako bi se minimizira negativan utjecaj na okoliš.

Solarne elektrane često se nalaze daleko od urbanih središta što izaziva gubicima u prijenosu električne energije u odnosu na krovne solarne panele.

#### **3.3.2. Nedostaci solarnih tornjeva**

Solarni tornjevi isto kao i solarne elektrane zahtijevaju veliku površinu, ona može biti manja kod najnovijih koji imaju veću energetske efikasnost.

Izgradnja solarnih tornjeva zahtijeva dulje vrijeme izgradnje radi veće složenosti te veću početnu investiciju u usporedbi sa solarnim elektranama koje se postupno mogu povećavati.

Solarni tornjevi zahtijevaju različite komponente, što ujedno povećava cijenu u €/MWh naprema solarnim elektranama koje su modularne i imaju mogućnost masovne proizvodnje.

Solarni tornjevi mogu se nalaziti u ruralnim ili izoliranim područjima, udaljenima od urbanih središta što izaziva gubicima u prijenosu električne energije.

#### **3.3.3. Nedostaci krovnih solarnih panela**

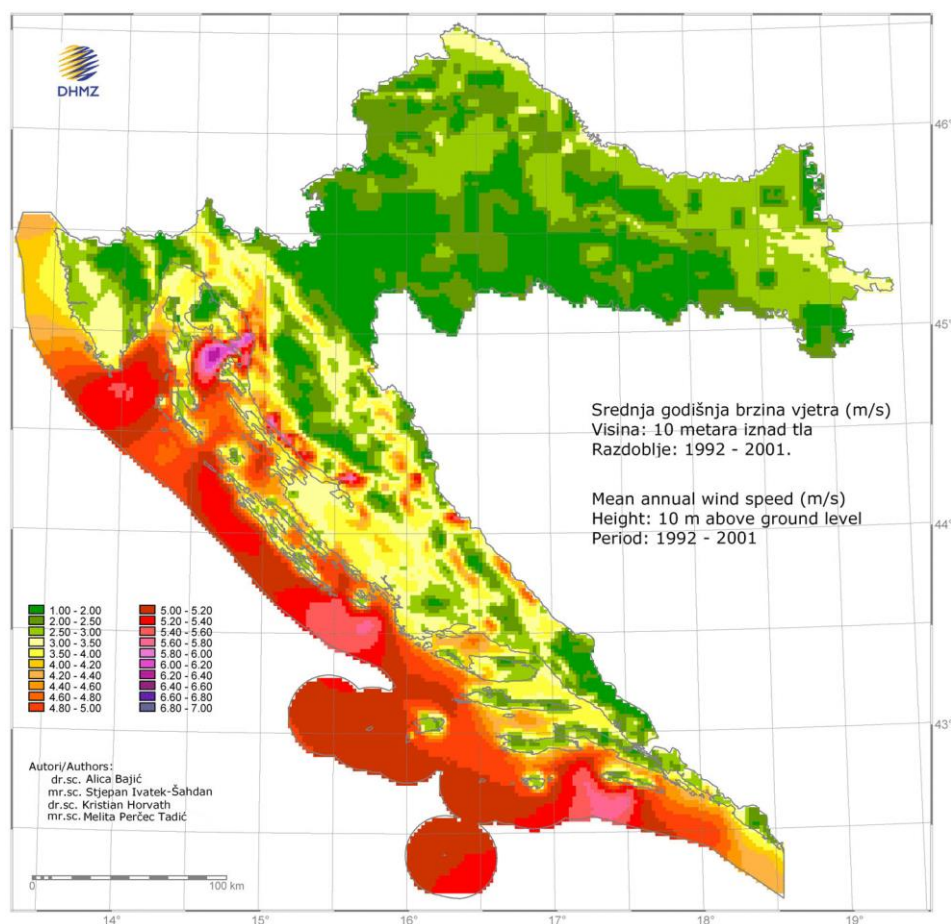
Oni ovise o postojećoj orijentaciji krova prilikom instalacije polegnutih solarnih panela te to značajno utječe na njihovu energetske efikasnost.

Estetski aspekti izgleda krova često utječu na odluku o instalaciji krovnih solarnih panela, te ujedno u velikoj većini slučajeva sprječava instalaciju pomičnih solarnih panela koji imaju veću energetske efikasnost i manje fluktuacije u proizvodnji električne energije.

Krovni solarni paneli se nalaze u više manjih sustava što rezultira značajno većoj cijenu po MWh u usporedbi sa drugim solarnim energetske sustavima.

#### 4. Usporedba različitih vjetroturbinskih sustava

Na energetska učinkovitost vjetroturbinskih sustava značajan utjecaj imaju faktori kao što su brzina vjetra, njegova konstantnost i turbulentnost. Geografske karakteristike, poput uskih prolaza između planina ili zgrada, mogu stvarati povećane brzine vjetra. Općenito, obalna područja i otvoreni prostori na moru pružaju veću brzinu i stabilnost vjetra, s manjom turbulentnošću. Ove karakteristike ilustrirane su na Slici 4.1, koja prikazuje srednju godišnju brzinu vjetra na području Hrvatske.



Slika 4.1. Karta Hrvatske sa srednjom godišnjom brzinom vjetra 10 m iznad tla [23]

Vjetroturbinski sustave možemo klasificirati prema tipu konstrukcije, HAWT („horizontal axis wind turbines“) vjetroturbine sa horizontalnom osi i VAWT („vertical axis wind turbines“) vjetroturbine sa vertikalnom osi. Trenutno, gotovo svi vjetroturbinski sustavi temelje se na HAWT dizajnu. VAWT vjetroturbine dalje se mogu podijeliti na tipove „savonius“ i „darrieus“. U teoriji, VAWT vjetroturbine tipa „darrieus“ mogu postići veću energetska efikasnost, imati nižu cijenu, jednostavniji dizajn, manje troškove održavanja, tiši rad te sposobnost da izdrže veće brzine vjetra u usporedbi s današnjim HAWT sustavima, no trenutno su lošiji od njih. [24]

## 4.1. Glavna podjela vjetroturbinskih sustava

### 4.1.1. Kopnene vjetroeletkrane:

Kopnene vjetroeletkrane uobičajeno se postavljaju na prostranim i ravnim površinama bez prepreka poput kuća ili drveća, kako bi se smanjila turbulencija vjetra. Razmak između dviju vjetroeletkrana ovisi o promjeru rotora turbine te se obično održava udaljenost od otprilike 5 promjera rotora. Ova udaljenost osigurava optimalne uvjete s minimalnim stvaranjem turbulencije od drugih susjednih vjetroeletkrana. Minimalna godišnja prosječna brzina vjetra za isplativost vjetroeletkrana mora biti najmanje 5.8 m/s. [25]



*Slika 4.3. Prikaz kopnenih vjetroeletkrana (HAWT) na poljoprivrednim poljima [26]*

#### 4.1.2. Morske vjetroelektrane

Morske vjetroturbine nalaze se na površini mora te se mogu klasificirati u dvije kategorije ovisno o vrsti podnožja, fiksirane i plutajuće vjetroturbine. Fiksne vjetroturbine čije je podnožje fiksirano na morsko dno ili jezero, obično se instaliraju na lokacijama gdje dubina nije veća od 50 metara. Plutajuće vjetroturbine s podnožjem sačinjenim od bova povezanim s kablovima na morsko dno, koriste na dubljim lokacijama do 1 kilometar dubine. Razmak između dviju morske vjetroturbine je isti kao i kod kopnene vjetroturbine, odnosno udaljenost od otprilike 5 promjera rotora. Promjer rotora morskih vjetroturbina je prosječno veći od kopnenih vjetroturbina te ujedno imaju veći instalirani kapacitet. [27]



*Slika 4.4. Prikaz morskih vjetroelektrana (HAWT) s različitim vrstama podloga [28]*

#### 4.1.3. Krovne vjetroturbine

Krovne vjetroturbine su puno manje što ujedno smanjuje njihovu energetska efikasnost. One se instaliraju na krovovima kuća, zgrada i tvornica. Minimalna godišnja prosječna brzina vjetra mora biti barem 4 m/s da bi krovne vjetroturbine bile isplative. Pri niskim minimalnim brzinama vjetra potrebnih za krovne vjetroturbine, krovni solarni paneli imaju veću energetska učinkovitost, naravno to ovisi o broju sunčanih sati u godini i drugim faktorima. Također, treba napomenuti da je ograničavajući faktor i mogućnost krovne konstrukcije da podnese instalaciju krovnih vjetroturbina koje su prosječno teže od krovnih solarnih panela. [29]



*Slika 4.5. Prikaz VAWT krovne vjetroturbine tipa „darrieus“ [30]*

## **4.2. Prednosti između vjetroturbinskih sustava**

### **4.2.1. Prednosti kopnenih vjetroelektrana**

Te turbine se masovno proizvode, što uzrokuje brzom i relativno jednostavnoj instalaciji naprema krovnim i morskim vjetroturbinama prema instaliranom kapacitetu.

Radi svoje modularnosti, visoke energetske efikasnosti i pristupačne pozicije imaju vrlo nisku cijenu u €/MWh u odnosu na morske vjetroelektrane i krovne vjetroturbine. Njihova niža cijena instalacije i održavanja čini ih privlačnijom opcijom za investitore.

Kopnene vjetroelektrane imaju manji trošak održavanja što proizlazi iz lakše dostupnosti i zamjene komponenti.

### **4.2.2. Prednosti morskih vjetroelektrana**

Te vjetroturbine imaju prednost veće brzine vjetra te njegovoj konzistentnošću zbog svoje lokacije na moru ili jezeru. Ovaj faktor direktno utječe na njihovu efikasnost u proizvodnji električne energije.

Radi većih brzina vjetra, vjetroturbine locirane na površini mora ili jezera imaju veće promjere rotora što ujedno povećava njihov instalirani kapacitet i energetske efikasnost.

Njihova instalacija na moru ne predstavlja rizik devastacije prirodnih staništa te ima manji utjecaj na populaciju ptica i njihovom manjom smrtnošću naprema drugim vjetroturbinama.

Za instalaciju morskih vjetroelektrana nije potrebna kupnja zemljišta, što čini ovu opciju atraktivnom u tome pogledu.

### **4.2.3. Prednosti krovnih vjetroturbina**

Postavljanje vjetroturbina na krovove omogućuje optimalno iskorištenje neiskorištenog prostora za proizvodnju vlastite električne energije.

Ove vjetroturbine imaju manje gubitke energije, koji se javljaju prijenosom električne energije preko velikih udaljenosti, jer su instalirane direktno do potrošača.

Također, one smanjuju opterećenje energetske mreže te osiguravaju električnu energiju u slučaju prekida u mreži te u kombinaciji sa solarnim krovnim panelima mogu smanjiti fluktuacije u proizvodnji električne energije.



### **4.3. Nedostaci između vjetroturbinskih sustava**

#### **4.3.1. Nedostaci kopnenih vjetroelektrana**

Ove vjetroturbine zahtijevaju optimalne topografske uvjete, poput ravnih površina ili vrhova brda, kako bi osigurao što konstantniji smjer vjetra, odnosno kako bi se smanjila turbulencija vjetra. Nedostatak ovakvih uvjeta može utjecati na učinkovitost i stabilnost električne energije koju proizvode ove vjetroelektrane.

Jedan od izazova kod instalacije ovih vjetroturbina na poljoprivrednim površinama je složenost postizanja dogovora sa vlasnicima zemljišta. Ovaj proces može biti dugotrajan i zahtijeva pažljivo upravljanje kako bi se postigao konsenzus i osiguralo potrebno zemljište za instalaciju vjetroelektrana i njihovo naknadno održavanje.

Kopnene vjetroelektrane mogu imati značajan utjecaj na populacije ptica, što može rezultirati visokom smrtnošću i ometanjem njihovih migracijskih ruta. Ovaj utjecaj na ptice može imati šire posljedice na ekosistem.

#### **4.3.2. Nedostaci morskih vjetroelektrana**

Morske vjetroelektrane zahtijevaju veću inicijalnu investiciju u usporedbi s kopnenim vjetroelektranama prema instaliranom kapacitetu. Ova povećana troškovna barijera ograničava širu primjenu morskih vjetroelektrana.

Budući da su one često smještene na udaljenim morskim područjima, postoji izazov u prijenosu električne energije do urbanih središta. Ova udaljenost može rezultirati većim gubicima struje tijekom prijenosa.

Radi instalacije na moru ili jezeru, na tome području već ne postoje dalekovodi, te je potrebno izgraditi nove, uključujući postavljanje kablova na dno mora ili jezera.

Održavanje morskih vjetroelektrana zahtijeva dodatne napore i troškove zbog izloženosti slanoj morskoj vodi. Korozivni učinak morske soli skraćuje životni vijek opreme i povećava potrebu za redovitim održavanjem i zamjenom komponenti.

Odabir mjesta za instalaciju morskih vjetroelektrana može potencijalno utjecati na morski promet radi postavljanja restrikcija plovidbe.

Morske vjetroelektrane, koje nisu fiksirane za morsko tlo već plutaju, su izložene jakim olujama i nevremenima koja se javljaju na otvorenom moru. Ovi ekstremni vremenski uvjeti mogu izazvati velika oštećenja opreme i smanjiti pouzdanost i stabilnost rada morskih vjetroelektrana.

#### 4.3.3. Nedostaci krovnih vjetroturbina

Zbog malih promjera rotora ove vjetroturbine imaju manju energetska efikasnost u usporedbi s većim kopnenim i morskim vjetroelektranama. Što su veće lopatice vjetroturbina, to je veća njihova energetska efikasnost.

Radi manjega promjer rotora zahtijevaju veće minimalne brzine vjetra kako po počele generirati električnu energiju u usporedbi sa kopnenim i morskim vjetroelektranama.

Krovnim vjetroturbinama je potrebna visoka godišnja brzina vjetra kako bi bile učinkovite, što ih čini neisplativima opcijom za većinu urbanih područja u usporedbi s krovnim solarnim panelima.

Proizvodnja krovnih vjetroturbina još nije u potpunosti dosegla potrebnu razinu za efikasnu i isplativu masovnu proizvodnju. To rezultira visokim troškovima proizvodnje i ograničenom dostupnošću na tržištu u usporedbi sa solarnim panelima.

Ove vjetroturbine ovisne su o postojećoj konstrukciji krove te se ne mogu instalirati na krovove koji ne mogu poduprijeti njihovu težinu.

## 5. Usporedba ukupne energetske učinkovitosti obnovljivih izvora energije

### 5.1. LCOE

Razina izjednačenih troškova električne energije (eng. “Levelized cost of electricity”, u nastavku LCOE) je metrika koja se koristi za kvantifikaciju prosječnih troškova proizvodnje električne energije tijekom prosječnog životnog vijeka energetskeg postrojenja. LCOE obuhvaća sve relevantne troškove, uključujući izgradnju, održavanje, iskop i obradu goriva, te uzima u obzir faktore kao što su vijek trajanja, kapacitet postrojenja i očekivani proizvodni kapacitet. LCOE izračunavamo tako da zbroj ukupnih troškova tijekom životnog vijeka podijelimo sa zbrojem električne energije proizvedene tijekom predviđenoga prosječnog životnog vijeka. LCOE možemo izraziti uz pomoć sljedeće formule: (5.1.) [31]

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (5.1.)$$

Gdje je:

$I_t$  – investicijski trošak u godini  $t$

$M_t$  – operacijski trošak i trošak održavanja u godini  $t$

$F_t$  – cijena potrošenog goriva u godini  $t$

$r$  – godišnja efektivna diskontna stopa

$E_t$  – proizvedena električna energija u godini  $t$

$n$  – očekivani životni vijek sistema

LCOE je dobiven kao prosjek te može značajno varira između različitih sustava ovisno o korištenoj tehnologiji i instaliranom kapacitetu. U pravilu sustavi s većim prosječnim troškovima su energetske efikasniji, ali istovremeno se povećava njihova cijena. Povećanjem ulaganja u obnovljive izvore energije i njihovom masovnom proizvodnjom smanjiti će se LCOE što će rezultirati njihovoj povećanoj dostupnosti.

U tablici (*Tablica 5.1.*) usporedbe ukupne energetske učinkovitosti obnovljivih izvora energije LCOE se prikazuje kao omjer eura po megavat satu (€/MWh) radi lakše usporedbe sa potrebnom površinom i analizom životnog ciklusa.

## 5.2. Zauzeta Površina

Zauzeta površina odnosi se na potrebnu površinu koju određeni energetska izvor zauzima, uključujući područje potrebno za postrojenje, kao i prostor za iskop, skladištenje i procesiranje goriva. Mjerna jedinica koju možemo koristiti za procjenu površinske gustoće je megavatsat po kvadratnom metru. Ova metrika omogućuje analizu učinkovitosti iskorištavanja prostora za generiranje električne energije te potencijalnog utjecaja na ekosistem.

Zauzeta površina u slučaju krovnih solarnih panela ili vjetroturbina on je efektivno nula jer je prostor već iskorišten, no i dalje je potreban određen prostor prilikom iskopa materijala te njihove proizvodnje. U slučaju vjetroelektrana na poljoprivrednim površinama ili površini mora, zauzeta površina je minimalna jer se gleda samo površina zauzeta podnožjem vjetroturbine, a prostor između vjetroturbina se i dalje može iskoristiti. Važno je istaknuti da površina potrebna za skladištenje energije kod varijabilnih obnovljivih izvora energije nije uključena u izračun, stoga potreban prostor je malo veći od navedenog. [32]

U tablici (*Tablica 5.1.*) usporedbe ukupne energetske učinkovitosti obnovljivih izvora energije potrebnu površinu ćemo prikazati kao omjer eura po megavat satu (€/MWh) radi lakše usporedbe sa LCOE i LCA.

## 5.3. LCA

Analizom životnog ciklusa (eng. "Life-cycle assessment", u nastavku LCA) je metodologija za procjenu ekološkog utjecaja na okoliš koji proizlazi iz cjelokupnog životnog ciklusa određenog izvora energije. LCA uzima u obzir emisije stakleničkih plinova u procesu izgradnje i proizvodnje sustava te prilikom potrošnje i obrade goriva tijekom svih faza životnog ciklusa sustava. Kroz LCA se izračunava ukupna količina ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) koja se emitira tijekom proizvodnje i korištenja energijskog sustava, te se uspoređuje s ukupnom električnom energijom koju sustav generira tijekom svog životnog vijeka. [33]

Važno je naglasiti da LCA varirat ovisno o različitim čimbenicima kao što su vrsta korištenog materijala, instaliranom kapacitetu, energetska efikasnosti, postupku proizvodnje te prosječnom životnom vijeku sustava. Podaci su zaokruženi prosjek prema najnovijim dostupnim podacima te može značajno varirati ovisno o korištenom sistemu.

U tablici (*Tablica 5.1.*) usporedbe ukupne energetske učinkovitosti obnovljivih izvora energije, LCA ćemo prikazati kao omjer kilograma ugljikovog dioksida ispuštenog po megavat satu (kgCO<sub>2</sub>/MWh) radi lakše usporedbe sa LCOE i potrebnom površinom.

## 5.4. Usporedba

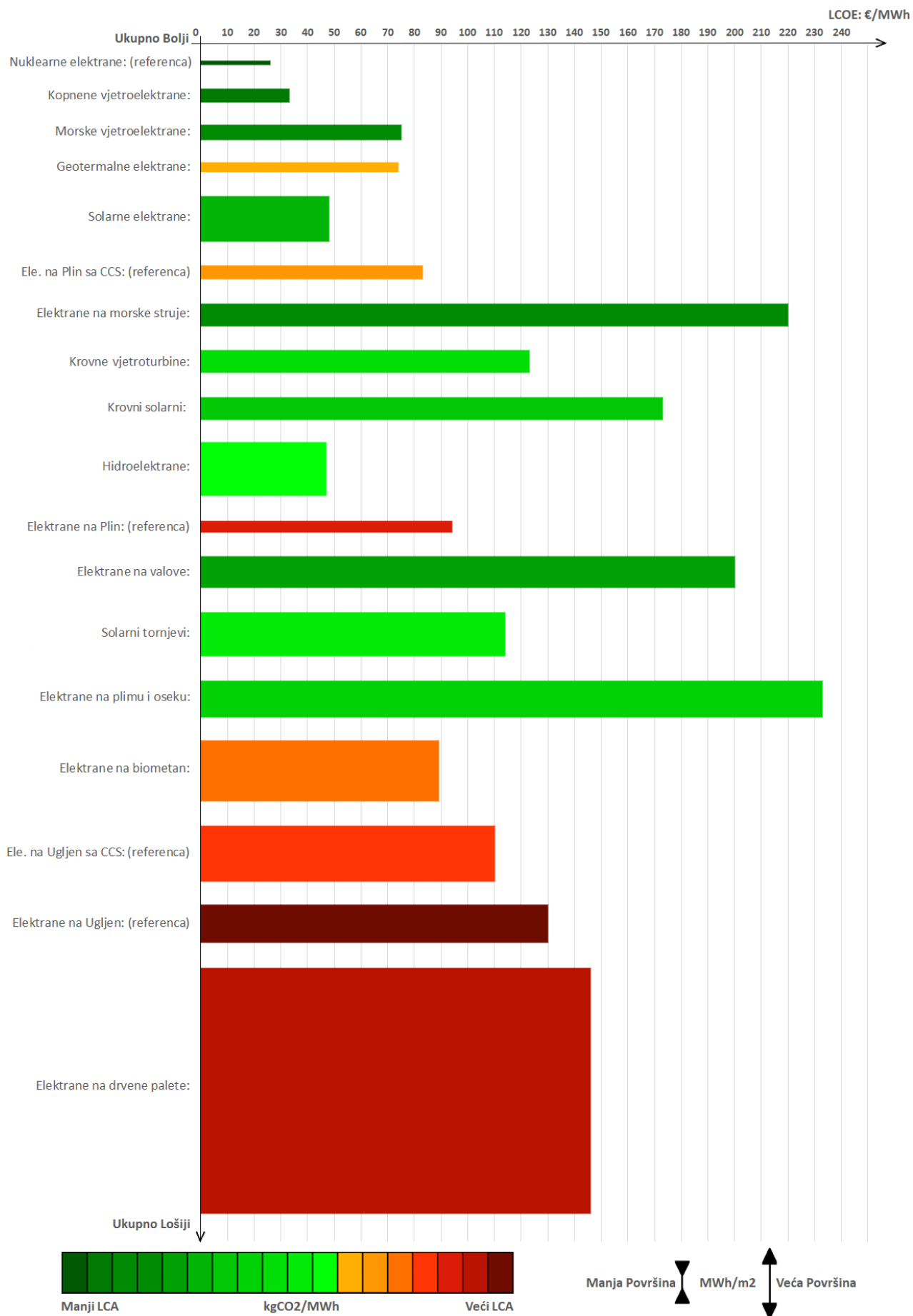
Tablica 5.1. Usporedba ukupne energetske učinkovitosti obnovljivih izvora energije

Sustav proizvodnje električne energije:	LCOE: €/MWh	Površina: m <sup>2</sup> /MWh	LCA: kgCO <sub>2</sub> /MWh
Solarni tornjevi:	114	22	0.038
Solarne elektrane:	48	19	0.029
Krovni solarni paneli:	173	2	0.032
Kopnene vjetroelektrane:	33	1.5	0.012
Morske vjetroelektrane:	75	1.5	0.016
Krovne vjetroturbine:	123	2	0.036
Hidroelektrane:	47	24	0.062
Geotermalne elektrane:	74	0.8	0.119
Elektrane na plimu i oseku:	233	11	0.034
Elektrane na morske struje:	220	2	0.016
Elektrane na valove:	200	5	0.022
Elektrane na biometan:	89	37	0.230
Elektrane na drvene palete:	146	862	0.740
Nuklearne elektrane: (referenca)	26	0.3	0.006
Elektrane na ugljen: (referenca)	130	15	0.924
Ele. na ugljen sa CCS: (referenca)	110	21	0.302
Elektrane na plin: (referenca)	94	1	0.458
Ele. na plin sa CCS: (referenca)	83	1.3	0.157

[32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44]

Ova tablica pruža nam približnu mogućnost usporedbe obnovljivih izvora energije i njihove ukupne energetske učinkovitosti. Međutim, važno je napomenuti da ove vrijednosti ne mogu direktno reprezentirati različite korištene tehnologije unutar grupe, budući da mogu značajno varirati zbog postupka zaokruživanja vrijednosti na srednju vrijednost. Ove vrijednosti su također vezane uz dostupnost najnovijih podataka te se mogu mijenjati kod modernijih sustava.

Važno je napomenuti da neke tehnologije, poput obnovljive izvore energije dobivenih od energija mora, se još uvijek razvijaju te nisu dosegule blizinu vrhunca vlastitog potencijala. Daljnjim ulaganjima i razvojem može se značajno unaprijediti njihova energetska učinkovitost. Posebno je to vidljivo u kontekstu LCOE-a, koji značajno opada s povećanjem proizvodnje te prelaskom na masovnu proizvodnju.



Slika 4.2. Grafički prikaz usporedbe obnovljivih izvora energije iz Tablice 5.1.

#### 5.4.1. Usporedba po LCOE

Kada usporedimo navedene oblike dobivanja električne energije prema LCOE po podacima dobivenih u *Tablici 5.1*. Možemo ih rangirati po sljedećem redosljedu, od najjeftinijega do najskupljega:

- Nuklearna elektrana: (referenca)
- Kopnene vjetroelektrane:
- Hidroelektrane:
- Solarne elektrane:
- Geotermalne elektrane:
- Morske vjetroelektrane:
- Elektrane na plin sa CCS: (referenca)
- Elektrana na biometan:
- Elektrane na plin: (referenca)
- Elektrane na ugljen sa CCS: (referenca)
- Solarni tornjevi:
- Krovne vjetroturbine:
- Elektrana na ugljen: (referenca)
- Elektrana na drvene palete:
- Krovne solarne:
- Elektrana na valove:
- Elektrana na morske struje:
- Elektrane na plimu i oseku:

U izračunu su uključeni svi aspekti prosječne cijene cjelokupnog sustava uključujući gorivo i skladištenje otpada. Međutim, dodatna financijska sredstva i porezna olakšanja koja se mogu dobiti od strane države nisu uzeta u obzir, a dodatni porezi koji su nametnuti zbog onečišćenja okoliša su uključeni.

Iako bi se na temelju usporedbe LCOE-a moglo zaključiti da su krovne vjetroturbine jeftinije po MWh u usporedbi s krovnim solarnim panelima, takvo zaključivanje često nije opravdano u većini slučajeva. Ključni faktor koji utječe na energetske učinkovitost krovnih vjetroturbina je prosječna godišnja brzina vjetra koja često nije dovoljno visoka u većini urbanih područja što jako ograničava njihovu usporedivost s krovnim solarnim panelima.

Možemo uočiti da su svi obnovljivi izvori energije dobiveni od energije mora na kraju liste, a to proizlazi iz toga da su ovi obnovljivi izvori slabo zastupljeni te nedovoljno razvijeni. To značajno povećava njihovu cijenu sustava u €/MWh. Daljnjim napretkom ovih tehnologija, povećati će se njihova energetska efikasnost, a širom primjenom elektrana na valove i elektrana na morske struje omogućiti će se njihova masovna proizvodnja što će ujedno značajno smanjiti njihov LCOE. Elektrane na plimu i oseke nemaju mogućnost veće primjene radi uskog područja primjene te nemogućnosti masovne proizvodnje tako da je vrlo vjerojatno da ovi obnovljivi izvori energije neće napredovati dalje.

Razlog zašto su krovni solarni paneli i vjetroturbine također nisko na ljestvici leži primarno u tome da su takvi sustavi puno manji. To ujedno značajno diže njihovu cijenu, pogotovo jer su samostalni i nepovezani sa susjednim sustavima. Iz tog razloga oni zahtijevaju pojedine iste komponente potrebne za rad sustava, koje u slučaju većeg proizvodnog volumena nisu potrebne. Cijena bi se, dakle, donekle mogla smanjiti zajedničkim komponentama potrebnim za rad takvih sustava. Tu se javljaju drugi problemi, te bi ujedno značajno povećalo logističke izazove te nije izvedivo bez potpore od strane zakona i državne inicijative.



#### 5.4.2. Usporedba po površini

Kada usporedimo navedene oblike dobivanja električne energije prema površini (m<sup>2</sup>) potrebnoj da generiraju jedan megavatsat po podacima dobivenih u Tablici 5.1. Možemo ih rangirati po sljedećem redoslijedu, od najmanje potrebne površine do najveće potrebne površine

- Nuklearna elektrana: (referenca)
- Geotermalne elektrane:
- Elektrane na plin: (referenca)
- Elektrana na plin sa CCS: (referenca)
- Kopnene vjetroelektrane:
- Morske vjetroelektrane:
- Krovne vjetroturbine:
- Krovne solarne:
- Elektrana na morske struje:
- Elektrana na valove:
- Elektrane na plimu i oseku:
- Elektrana na ugljen: (referenca)
- Solarne elektrane:
- Elektrana na ugljen sa CCS: (referenca)
- Solarni tornjevi:
- Hidroelektrane:
- Elektrana na biometan:
- Elektrana na drvene palete:

Pri izračunu su uzete u obzir površine rudnika potrebnih za iskop materijala neophodnih za konstrukciju, kao i površine za iskop, preradu i uzgoj goriva. Međutim, površina potrebna za skladištenje energije kod obnovljivih izvora s varijabilnom proizvodnjom energije nije obuhvaćena dok je površina potrebna za skladištenje otpada poput nuklearnog i ugljenog otpada uključena u izračun. Površina koja se nalazi ispod zemlje nije obuhvaćena u izračunu.

U izračunu površine potrebne za hidroelektrane uključena je i površina potrebna za akumulacijsko jezero, što značajno utječe na njihovu poziciju na ljestvici. Iako izgradnja hidroelektrana može rezultirati uništenjem velikog dijela ekosustava zbog stvaranja akumulacijskog jezera, tijekom vremena se formira novi ekosustav unutar jezera. Stoga, hidroelektrane bi zapravo trebale biti visoko rangirane na ljestvici MWh/m<sup>2</sup>. To bi ujedno poboljšalo njihovu poziciju na ukupnoj ljestvici.

Jedan od aspekata koji se može procijeniti putem ove metrike jest koliko se postojeći ekosustav uništava radi potreba određenog izvora energije. To je jedan od razloga zašto elektrane na drvene palete zauzimaju tako nisko mjesto na ljestvici, upravo zbog toga što zahtijevaju velike površine. Vrijeme potrebno prirodi da se ekosustav oporavi nije jednako vremenu koje je potrebno da drveće brzog rasta izraste. Ponovnim krčenjem tih šuma ekosustav se nanovo uništava te se nikada ne bi u potpunosti oporavio.

Potrebno je naglasiti da, u slučaju plina, usporedba po površini može biti zavaravajuća s obzirom da se eksploatacija uglavnom odvija putem bušotina umjesto velikih rudnika. Ovo je posebno vidljivo kod plinskih elektrana opremljenih sustavom za hvatanje i skladištenje CO<sub>2</sub>, gdje se ispušni plinovi iz elektrane vraćaju u podzemne špilje. Međutim, postoji značajan rizik od nekontroliranog ispuštanja plinova iz podzemnih špilja u atmosferu.

Na temelju usporedbe potrebne površine za proizvodnju jednog MWh, možemo zaključiti da i solarne elektrane i solarni tornjevi zahtijevaju veliku površinu, što negativno utječe na ekosustav. Ovo naglašava potrebu za većim korištenjem solarnih panela na krovovima u urbanim područjima, unatoč većoj cijeni po MWh koja se primjećuje u usporedbi po LCOE.

### 5.4.3. Usporedba po LCA

Kada usporedimo navedene oblike dobivanja električne energije LCA po podacima dobivenih u *Tablici 5.1*. Možemo ih rangirati po sljedećem redoslijedu, od najmanje potrebne površine do najveće potrebne površine:

- Nuklearna elektrana: (referenca)
- Kopnene vjetroelektrane:
- Morske vjetroelektrane:
- Elektrana na morske struje:
- Elektrana na valove:
- Solarne elektrane:
- Krovne solarne:
- Elektrane na plimu i oseku:
- Kućne vjetroturbine:
- Solarni tornjevi:
- Hidroelektrane:
- Geotermalne elektrane:
- Ele. na Plin sa CCS: (referenca)
- Elektrana na biometan:
- Ele. na Ugljen sa CCS: (referenca)
- Elektrane na Plin: (referenca)
- Elektrana na drvene palete:
- Elektrana na Ugljen: (referenca)

Radi potreba izračuna LCA uzeta su u obzir zagađenja koja proizlaze iz izgradnje i operacije određenog izvora energije. Ovo obuhvaća i zagađenja koje se javljaju tijekom prerađivanja materijala potrebnih za izgradnju, kao i procesa obrade goriva.

Glavni razlog za lošu poziciju hidroelektrana na ljestvici LCA u usporedbi sa drugim obnovljivim izvorima leži u tome da su potrebne ogromne količine betona prilikom izgradnje brane.

Iz navedenog bi se moglo zaključiti da elektrane na biometan uzrokuju značajno zagađenje. Kada se razmotre dodatne činjenice, postaje jasno da biootpadi i dalje proizvode metan na odlagalištima, a taj metan je 25 puta [45] štetniji od CO<sub>2</sub>. Stoga, elektrane na biometan, čak i kada bi emitirale ugljikov dioksid, bi imale pozitivan utjecaj jer prerađuju biootpad i s time direktno smanjuju emisije više štetnog metana.

## 6. Zaključak

Trenutačni prijelaz na čiste izvore električne energije kao što su: solarni sustavi i vjetroelektrane; zahtijeva integraciju, ulaganje i razvoj drugih energetske izvora poput plinskih elektrana na metan, hidroelektrana i nuklearnih elektrana. Međutim, ovi izvori zaostaju u razvoju i proširenju svojih kapaciteta kako bi se zadovoljila rastuća globalna potražnja za električnom energijom. Stoga je ključno uspostaviti sinergiju između različitih oblika energetske izvora kako bi se osigurala pouzdana i održiva opskrba električnom energijom te istovremeno smanjio negativni utjecaj na okoliš.

Optimalna lokacija za postavljanje vjetroelektrana je na moru ili na već postojećim poljoprivrednim površinama kako bi se minimalno narušio ekosistem. Uz to, treba ulagati u razvoj vertikalnih vjetroelektrana koje mogu u teoriji imati veću maksimalnu efikasnost od klasičnih vjetroturbin. Također, potrebno je razviti vjetroelektrane prilagođene područjima s niskom prosječnom brzinom vjeta, koje se mogu instalirati na krovovima zgrada u kombinaciji sa solarnim panelima. Ovaj integrirani pristup optimizira iskorištavanje energije vjeta i sunca te smanjuje štetni utjecaj na okoliš i fluktuacijama u proizvodnji električne energije.

U cilju očuvanja ekosustava potrebna je povećana instalacija solarnih ćelija na krovovima umjesto degradacije prirodnih područja kao što su: šume, livade i pašnjaci; radi izgradnje ogromnih solarnih elektrana. Potrebno je ubrzanje postupka dobivanja potrebnih dozvola i financijskih sredstava za instalaciju solarnih ćelija. Potrebno je informirati javnost da izgled krova nije presudan za korištenje pomičnih solarnih panela umjesto fiksnih, budući da pomični paneli pružaju veću efikasnost i manje fluktuacije u proizvodnji električne energije. Nadalje, važno je ulagati u razvoj i napredak solarnih panela i solarnih tornjeva radi daljnjeg unapređenja tehnologije. Države i općine bi trebali preuzeti inicijativu te u isto vrijeme instalirati na području cijeloga grada solarne panele na krovovima što bi značajno smanjilo njihovu cijenu u €/MWh.

Većina biogoriva, osim biometana koji se dobiva reciklažom biološkog otpada, nije ekonomski održiva niti ekološki prihvatljiva opcija. Njihova uporaba nosi rizike za bioraznolikost, potrošnju pitke vode, emisiju stakleničkih plinova i konkurenciju s poljoprivrednom proizvodnjom hrane. Osim toga, njihova postojanja često ovise o financijskim potporama države, koje bi se moglo bolje iskoristiti za razvoj drugih obnovljivih ili čistih izvora energije. Također, važno je poboljšanje sustava za sakupljanje biootpada, uključujući posebne kontejnere u urbanim područjima, kako bi se maksimalno smanjiti ispuštanje metana i iskoristio za biometan. Također je ključno aktivno sakupljati i zbrinjavati ugljikov dioksid koji nastaje prilikom izgaranja metana, kako bi se spriječilo njegovo ispuštanje u atmosferu.

Elektrane na plimu i oseku ograničene su na mali broj geografski povoljnih područja s velikim uvalama te nisu energetske učinkovite na područjima gdje je razlika između plime i oseke manja od 5 metara. Građenje ovih brana ima značajan negativan utjecaj na morski ekosustav.

Postizanje značajnog napretka i osiguravanje dostupne i jeftine energije bit će moguće kroz uspješan razvoj fuzijskih reaktora kao izvora energije. Stoga je ključno dodatno ulagati u istraživanje i razvoj fuzijske tehnologije. Srećom, posljednjih godina zabilježen je značajan porast investicija što je rezultiralo brojnim napredcima u području nuklearne fuzije. Daljnje povećanje investicija i suradnja među znanstvenicima, industrijskim partnerima i vladama bit će od vitalne važnosti kako bi se ostvarili održivi i praktični fuzijski reaktori. Kada postignemo ovaj cilj, otvorit će se put prema sigurnoj energetskoj budućnosti koja osigurava obilje čiste, sigurne i neiscrpane energije.

Iako su cilj istraživanja za ovaj završni rad bili obnovljivi izvori energije, važno je istaknuti rezultate nuklearnih elektrana koji su bili korišteni kao referenca. Na temelju prikupljenih podataka jasno je vidljivo da su trenutno nuklearne elektrane neusporedivo superiornije u svim područjima naprema drugim metodama proizvodnje električne energije. Ova dominacija će i dalje ostati sve dok se ne razviju fuzijski reaktori. Iznimno je žalosno što postoji široko rasprostranjeno negativno mišljenje javnosti o nuklearnoj energiji unatoč njezinom ogromnom potencijalu, ne samo u području generiranja energije već i u drugim sferama. Primjerice u pogonu svemirskih brodova s većom učinkovitošću od raketnih goriva. Posebno je važno naglasiti da kada se ne bi u prošlosti prestalo ulagati u nuklearnu energiju, bilo bi moguće postići još veću razinu sigurnosti (unatoč već visokoj razini sigurnosti), energetske učinkovitost, razvoj obogaćivanja urana i nuklearnih reaktora baziranih na Toriju, koji ima manju razinu radioaktivnosti. Takvim napredcima već bismo danas mogli živjeti u svijetu sa minimalnim uništavanjem ekosistema i zagađenjem za proizvodnju električne energije.

Na temelju prikupljenih podataka, može se zaključiti da je trenutni tempo tranzicije prema obnovljivim izvorima energije nedovoljno brz kako bi se na vrijeme suzbilo globalno zatopljenje. Stoga je nužno ulagati u razvoj aktivnih sustava koji omogućuju sakupljanje CO<sub>2</sub> iz atmosfere. Ova tehnologija, zajedno s daljnjim napretkom u obnovljivim izvorima energije, ključna je za postizanje ciljeva održivog razvoja i smanjenje negativnih utjecaja na klimatske promjene.

## 7. Literatura

- [1] Izvor: (Slike je uređena radi prijevoda na hrvatski) „Ember data“, <https://ember-climate.org/countries-and-regions/regions/world/>, preuzeto s interneta 21.05.2023
- [2] Izvor: (Slike je uređena radi prijevoda na hrvatski) „Types of Hydropower Plants“, <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants>, preuzeto s interneta 23.05.2023
- [3] Izvor: „Three Gorges Dam“, <https://www.power-technology.com/projects/gorges/>, preuzeto s interneta 23.05.2023
- [4] Izvor: „Vulcan Street Plant“, [https://ethw.org/Milestones:Vulcan\\_Street\\_Plant,\\_1882](https://ethw.org/Milestones:Vulcan_Street_Plant,_1882), preuzeto s interneta 23.05.2023
- [5] Izvor: „Krka beyond the waterfalls“ <https://total-croatia-news.com/news/travel/krka-beyond-the-waterfalls-world-s-second-oldest-hydroelectric-power-plant/>, preuzeto s interneta 23.05.2023
- [6] Izvor: (Slike je uređena radi prijevoda na hrvatski) „Solar panel“, <https://www.engineeringpassion.com/what-is-a-solar-panel-and-how-do-solar-panels-work/>, preuzeto s interneta 24.05.2023
- [7] Izvor: „A Brief History of Solar Panels“, <https://www.smithsonianmag.com/sponsored/brief-history-solar-panels-180972006/>, preuzeto s interneta 24.05.2023
- [8] Izvor: „Most Efficient Solar Panels 2023“, <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>, preuzeto s interneta 24.05.2023
- [9] Izvor: (Slike je uređena radi prijevoda na hrvatski) „Windturbine“, [https://www.researchgate.net/figure/A-typical-layout-of-equipment-inside-the-nacelle-of-a-modern-wind-turbine-Source\\_fig21\\_332401345](https://www.researchgate.net/figure/A-typical-layout-of-equipment-inside-the-nacelle-of-a-modern-wind-turbine-Source_fig21_332401345), preuzeto s interneta 24.05.2023
- [10] Izvor: „Windturbine Efficiency“, [https://www.vernier.com/experiment/rev-12\\_turbine-efficiency/](https://www.vernier.com/experiment/rev-12_turbine-efficiency/), preuzeto s interneta 24.05.2023
- [11] Izvor: „The Giant Brush Windmill“, <https://web.archive.org/web/20080908061207/http://www.windpower.org/en/pictures/brush.htm>, preuzeto s interneta 25.05.2023
- [12] Izvor: „Biofuel“, <https://www.britannica.com/technology/biofuel>, preuzeto s interneta 25.05.2023
- [13] Izvor: „Types of Ocean Energy“, <https://www.earthreminder.com/types-of-ocean-energy-and-how-does-it-work/>, preuzeto s interneta 25.05.2023

- [14] Izvor: „Geothermal power plants“, [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Geothermal\\_power\\_plants](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Geothermal_power_plants), preuzeto s interneta 26.05.2023
- [15] Izvor: „Global geothermal market and technology assessment“, <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-geothermal-market-and-technology-assessment>, preuzeto s interneta 26.05.2023
- [16] Izvor: (Slike je uređena radi prijevoda na hrvatski) „Solar resource maps of World“, <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>, preuzeto s interneta 26.05.2023
- [17] Izvor: „Worlds biggest solar farm“, <https://www.businessinsider.com/india-harnessing-renewable-energy-through-worlds-biggest-solar-farm-2022-11>, preuzeto s interneta 26.05.2023
- [18] Izvor: „Monocrystalline vs. polycrystalline solar panels“, <https://news.energysage.com/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar/>, preuzeto s interneta 27.05.2023
- [19] Izvor: (Slike je uređena radi prijevoda na hrvatski) „Concentrating Solar Power“, <https://www.energy.gov/concentrating-solar-power>, preuzeto s interneta 27.05.2023
- [20] Izvor: „Renewable energy technologies: cost analysis series“, [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE\\_Technologies\\_Cost\\_Analysis-CSP.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE_Technologies_Cost_Analysis-CSP.pdf), preuzeto s interneta 27.05.2023
- [21] Izvor: „Solar panel direction“, <https://www.solarips.com/home-solar-101-does-my-roof-have-to-face-south-f>, preuzeto s interneta 27.05.2023
- [22] Izvor: „Types of Solar Trackers“, <https://www.solarfeeds.com/mag/solar-trackers-types-and-its-advantages-and-disadvantages>, preuzeto s interneta 28.05.2023
- [23] Izvor: „Državni hidrometeorološki zavod“, [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_hrvatska&param=k1\\_8](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska&param=k1_8), preuzeto s interneta 28.05.2023
- [24] Izvor: „Types of wind turbines“, <https://energyfollower.com/types-of-wind-turbines/>, preuzeto s interneta 28.05.2023
- [25] Izvor: „Harnessing wind power“, <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/where-wind-power-is-harnessed.php>, preuzeto s interneta 28.05.2023

- [26] Izvor: „Vertical turbines will enhance the efficiency of future wind farms“, <https://www.innovationnewsnetwork.com/vertical-turbines-enhance-efficiency-of-wind-farms/11066/>, preuzeto s interneta 28.05.2023
- [27] Izvor: „Expanding Offshore Wind“, <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/716891572457609829/going-global-expanding-offshore-wind-to-emerging-markets%7cgoing>, preuzeto s interneta 28.05.2023
- [28] Izvor: „Offshore Wind Energy“, <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/top-10-things-you-didnt-know-about-offshore-wind-energy>, preuzeto s interneta 29.05.2023
- [29] Izvor: „Energy Efficiency of Small Wind Turbines in an Urbanized Area“, <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/14/5287> -preuzeto s interneta 29.05.2023
- [30] Izvor: „roof VAWT picture“, <https://qph.cf2.quoracdn.net/main-qimg-e442a9c29f419e823016052c1a15f620.webp>, preuzeto s interneta 29.05.2023
- [31] Izvor: „Levelized Cost of Energy“, <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/levelized-cost-of-energy-lcoe/>, preuzeto s interneta 30.05.2023
- [32] Izvor: „Land use of different electricity sources comparison“, <https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source>, preuzeto s interneta 30.05.2023
- [33] Izvor: „Life cycle assessment of electricity generation“, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666792421000500>, preuzeto s interneta 30.05.2023
- [34] Izvor: „Final Report Cost of Energy“ [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-10/final\\_report\\_levelised\\_costs\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-10/final_report_levelised_costs_0.pdf), preuzeto s interneta 30.05.2023
- [35] Izvor: „Levelised Cost of Electricity Calculator“ <https://www.oecd-neo.org/lcoe/>, preuzeto s interneta 30.05.2023
- [36] Izvor: „Renewable Power Generation Costs“, <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>, preuzeto s interneta 30.05.2023
- [37] Izvor: „Cost of Wind Energy Review“, <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84774.pdf>, preuzeto s interneta 30.05.2023



- [38] Izvor: „Levelized Cost of Energy“, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/LCOE.pdf>, preuzeto s interneta 30.05.2023
- [39] Izvor: „Land-Use Change and Bioenergy Production“, [https://mdpi-res.com/d\\_attachment/energies/energies-14-04001/article\\_deploy/energies-14-04001-v2.pdf?version=1625309358](https://mdpi-res.com/d_attachment/energies/energies-14-04001/article_deploy/energies-14-04001-v2.pdf?version=1625309358), preuzeto s interneta 30.05.2023
- [40] Izvor: „Biomass and land use“ <https://www.biofuelwatch.org.uk/2018/biomass-and-land-use/>, preuzeto s interneta 30.05.2023
- [41] Izvor: „Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources“, [https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA\\_3\\_FINAL%20March%202022.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf), preuzeto s interneta 31.05.2023
- [42] Izvor: „Carbon Footprint of Renewable Energy“, <https://impactful.ninja/the-carbon-footprint-of-renewable-energy>, preuzeto s interneta 31.05.2023
- [43] Izvor: „Greenhouse Gas Emissions from Geothermal Power Production“, <https://documents1.worldbank.org/curated/en/875761592973336676/pdf/Greenhouse-Gas-Emissions-from-Geothermal-Power-Production.pdf>, preuzeto s interneta 31.05.2023
- [44] Izvor: „Life cycle assessment of marine current turbine“, <https://www.research.ed.ac.uk/en/publications/life-cycle-assessment-of-the-seagen-marine-current-turbine>, preuzeto s interneta 31.05.2023
- [45] Izvor: „Methane“, <https://www.epa.gov/gmi/importance-methane#:~:text=Methane%20is%20more%20than%2025,dueto%20human%2Drelated%20activities>, preuzeto s interneta 07.06.2023

## **8. Popis oznaka i kratica**

LCOE – „levelized cost of electricity“ – razina izjednačenih troškova električne energije

LCA – „life-cycle assessment“ – analiza životnog ciklusa

CCS – „carbon capture and storage“ – hvatanje i skladištenje ugljikovog dioksida

HAWT – „horizontal axis wind turbines“ – vjetroturbine sa horizontalnom osi

VAWT – „vertical axis wind turbines“ – vjetroturbine sa vertikalnom osi.

CO<sub>2</sub> – „carbon dioxide“ – ugljikov dioksid

m<sup>2</sup> – „square meters“ – metri kvadratni

MWh – „megawatt hours“ – megavat sati

## **9. Ključne riječi**

Energetska učinkovitost, Obnovljivi izvori energije, Hidroenergija, Solarna energija, Energija vjetra, Bioenergija, Energija mora, Geotermalna energija, Solarne elektrane, Solarne farme, Solarni tornjevi, Krovni solarni paneli, Kopnene vjetroelektrane, Morske vjetroelektrane, Krovne vjetroturbine, LCOE, Zauzeta površina po MWh, LCA, Usporedba izvora energije.

## **10. Keywords**

Energy efficiency, Renewable energy sources, Hydro energy, Solar energy, Wind energy, Bioenergy, Sea energy, Geothermal energy, Solar power plants, Solar farms, Solar towers, Rooftop solar panels, Onshore wind turbines, Offshore wind turbines, Rooftop wind turbines, LCOE, Occupied area per MWh, LCA, Comparison of energy sources.

## 11. Sažetak

Obnovljivi izvori energije igraju ključnu ulogu u tranziciji sa fosilnih goriva na čiste izvore energije. Analizom prikupljenih podataka uočava se globalni pad udjela električne energije proizvedene putem hidroelektrana i nuklearnih elektrana, što rezultira vrlo malim godišnjim globalnim porastom udjela čistih izvora energije od svega 0,27%.

Na temelju prikupljenih podataka, vjetroelektrane na kopnu i moru ističu se kao najisplativiji oblik obnovljive energije. Kopnene vjetroelektrane postižu LCOE (razina izjednačenih troškova električne energije) od 33 €/MWh, dok morske vjetroelektrane imaju LCOE od 75 €/MWh. Oba tipa vjetroelektrana zahtijevaju malu površinu od samo 1.5 m<sup>2</sup>/MWh, to ujedno ukazuje na mali utjecaj na prirodna staništa. Također, kopnene i morske vjetroelektrane pokazuju vrlo niski ekološki utjecaj prema LCA (analiza životnog ciklusa) s emisijama od samo 0.012 kgCO<sub>2</sub>/MWh za kopnene vjetroelektrane i 0.016 kgCO<sub>2</sub>/MWh za morske vjetroelektrane.

Elektrane na morske struje, iako imaju veliki potencijal, trenutno su slabo zastupljene i nedovoljno istražene, što je vidljivo i po visokom LCOE od 220 €/MWh.

Prema provedenom istraživanju, važno je naglasiti potrebu za širom primjenom krovnih solarnih panela s mogućnošću rotacije, budući da takvi paneli pokazuju značajno veću energetske učinkovitost u odnosu na fiksne panele. Specifično, solarni paneli s rotacijom oko jedne osi ostvaruju energetske učinkovitost koja je veća za 32% u odnosu na fiksne panele, dok paneli s rotacijom dvije osi ostvaruju čak 47% veću energetske učinkovitost.

Prema istraživanju provedenom u okviru ovog rada naglašava se važnost veće primjene elektrana na biometan. Metan će nastati biološkim procesima na odlagalištima otpada te se to može spriječiti aktivnim sakupljanjem biološkoga otpada. S obzirom na to da je metan 25 puta štetniji od CO<sub>2</sub>, ova tehnologija ima značajan potencijal za smanjenje emisija stakleničkih plinova.

## 12. Abstract

Renewable energy sources play a crucial role in the transition from fossil fuels to clean energy sources. The analysis of gathered data reveals a global decline in the share of electricity produced from hydroelectric and nuclear power plants, resulting in a very small annual global increase in the share of clean energy of only 0.27%.

Based on the collected data, onshore and offshore wind farms stand out as the most cost-effective form of renewable energy. Onshore wind farms achieve a LCOE (Levelized Cost of Electricity) of 33 €/MWh, while offshore wind farms have an LCOE of 75 €/MWh. Both types of wind farms require a small footprint of only 1.5 m<sup>2</sup>/MWh, indicating a minimal impact on natural habitats. Additionally, onshore and offshore wind farms show very low environmental impact according to LCA (Life Cycle Analysis) with emissions of only 0.012 kgCO<sub>2</sub>/MWh for onshore wind farms and 0.016 kgCO<sub>2</sub>/MWh for offshore wind farms.

Tidal power plants, although having great potential, are currently underrepresented and insufficiently researched, as evidenced by their high LCOE of 220 €/MWh.

According to the conducted research, it is important to emphasize the need for widespread implementation of rooftop solar panels with rotation capability, as such panels demonstrate significantly higher energy efficiency compared to fixed panels. Specifically, solar panels rotating around one axis achieve an energy efficiency that is 32% higher than fixed panels, while panels rotating around two axes achieve an even higher energy efficiency of 47%.

The research conducted within this study highlights the importance of greater implementation of biogas power plants. Methane will be produced through biological processes in waste landfills, this can be prevented by actively collecting biowaste. Considering that methane is 25 times more harmful than CO<sub>2</sub>, this technology has significant potential for reducing greenhouse gas emissions.