

TRAJNOSTNI VIRI IN TEHNOLOGIJE

Seminarska naloga pri zunanjem izbirnem predmetu Trajnostno inženirstvo (TI-1879-0), na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani

Avtor: Ines Velić

Mentor: prof. dr. Matjaž Mikoš

Študijsko leto: 2024/2025

Ljubljana, 2025

Kazalo

Vsebina

Uvod	3
Trajnost in trajnostni razvoj	4
Kakšna je rešitev?	6
Trajnostni viri energije in elektroenergetski sistem	9
Obnovljivi viri energije.....	13
Obnovljivi viri energije: naravno obnovljajoči viri	14
Trajnostni viri energije: dolgoročna sprejemljivost.....	14
OVE v Sloveniji	16
Sintetična goriva in obnovljiv ogljik.....	16
Potrebe po energentih leta 2050	18
Viri brezogljicne električne energije v Sloveniji.....	18
Izzivi sezonskega skladiščenja energije	19
Zaključek poglavja	19
Delež OVE po svetu	20
VODNA ali HIDROENERGIJA.....	22
VETERNA ENERGIJA	28
SONČNA ENERGIJA	32
BIOENERGIJA	35
GEOTERMALNA ENERGIJA.....	37
ENERGIJA PLIMOVANJA.....	39
ENERGIJA OSMOZE.....	42
Pomen uporabe trajnostnih tehnologij za prihodnost.....	44
Primeri trajnostnih tehnologij in njihova uporaba.....	44
TRAJNOSTNE TEHNOLOGIJE V KMETIJSTVU	44
ZAJEMANJE, UPORABA IN SHRANJEVANJE OGLJIKA	46
Zgodovina in trenutno stanje	47
Pregled procesa	48
Procesi zajemanja	48
Skladiščenje in izboljšano pridobivanje nafte	48
Dolgotrajno uhajanje CO ₂	49
Socialni in okoljski vplivi, ter stroški	50
Učinkovitost v trajnostnem razvoju	50
Socialna dilema.....	51

Uporaba CCS v Evropi	51
Neposreden zajem ogljika iz zraka in shranjevanje.....	52
Povzetek	52
Bioenergija s tehnologijo zajema in shranjevanja ogljika	53
VODIKOVE ali GORIVNE CELICE	54
Jedrska energija kot OVE?	56
Zaključek.....	58
Viri	59

Uvod

Skozi celoten semester sem pri predmetu Trajnostno inženirstvo raziskovala pomen trajnosti, novih in zanimivih rešitev za prihodnost našega planeta, ter napisala nekaj člankov na to temo. To me je spodbudilo, da sem se pri seminarskem delu še bolj poglobila v sam pomen trajnosti in vpliv na našo družbo ter raziskovala ključne rešitve, ki so potrebne za doseganje ciljev, če želimo ohraniti naše okolje in omogočiti kakovostno življenje tudi prihodnjim generacijam. Pri tem sem se osredotočila na tehnologije, ki ne le zmanjšujejo emisije, temveč tudi izboljšujejo učinkovitost rabe energije ter spodbujajo pravičnejšo globalno porazdelitev virov. Čeprav se o podnebnih spremembah veliko govori, imam občutek, da se pove premalo. Zlasti na ravni laične javnosti, ki znanstvenih vidikov te problematike ne pozna dovolj dobro. Zaradi tega pogosto prihaja do napačnega razumevanja vzrokov in posledic podnebnih sprememb, kar vodi v zmedo in napačne zaključke. Tukaj nosita veliko odgovornost politika in mediji. O tem sem že pisala v prejšnjih člankih, a bi ponovno želela poudariti, da je pri t. i. zelenem prehodu ključno upoštevati mnenja strokovnjakov. S tem ne mislim zgolj na vladine svetovalce, temveč predvsem na naravoslovno usmerjene strokovnjake – fizike, energetike, meteorologe, geografe, geologe in druge znanstvenike, ki se ukvarjajo s procesi na Zemlji, s podnebnimi spremembami ter delovanjem naravnih in energetskega sistemov. Njihovo znanje bi moralo imeti večjo težo pri sprejemanju odločitev, saj izhaja iz podatkov, raziskav in neposredne izkušnje z realnimi izzivi, ne iz političnih agend.

A ta problematika ni zgolj slovenska, podnebne spremembe in trajnostna prihodnost sta globalna izziva, ki bi ju moral svet reševati sistematično in usklajeno. Pisala sem tudi o podnebnih konferencah, kjer se srečujejo predstavniki držav z namenom, da bi sprejeli določene dogovore, med drugimi pa sprejeli tudi zavezo o postopnem opuščanju fosilnih goriv. Tako v politiki kot v medijih, na forumih in med zelenimi aktivisti potekajo številne razprave o tem, kako zmanjšati izpuste toplogrednih plinov. Rezultat tega so številni načrti, kako mora človeštvo v bližnji prihodnosti ukrepati, spremeniti življenjske razvade, da ne bomo več onesnaževali in segrevali ozračje.

Eden najambicioznejših okoljskih načrtov je Zeleni dogovor Evropske unije (v nadaljevanju EU) »Green Deal«, ki si prizadeva, da bodo države EU do leta 2050 dosegle podnebno nevtralnost z ničelno emisijo toplogrednih plinov, brez fosilnih (in tudi jedrskih) goriv, s popolnim preходом na obnovljive vire energije (v nadaljevanju OVE). A ključno vprašanje ostaja, ali je ta načrt sploh ustrezen in izvedljiv? Ga lahko uresničimo brez ogrožanja stabilnosti energetskega sistema in ob upoštevanju sodobnih potrošniških potreb družbe? Kar se tiče Slovenije, pridno sledimo evropskim smernicam in smo jih podali v posodobljenem nacionalnem energetskega in podnebnem načrtu (v nadaljevanju NEPN). A stvari se lahko do leta 2050 še bistveno spremenijo, ker je še vedno veliko neznank, tudi o bodočih tehnologijah – uporaba vodika, hranilniki energije, novi tipi jedrskih elektrarn itd. Vse omenjene strategije in scenariji so pisani zelo populistično, politično všečno. Toda še enkrat se vprašajmo, ali so ti načrti dejansko izvedljivi v realnosti – zlasti če se upošteva naravne fizikalne in termodinamske zakone ter tehnološko zrele tehnologije? Zelena politika je obljubljala, da se bosta z naraščanjem deleža obnovljivih virov energije (v nadaljevanju OVE) cena energije in poraba fosilnih goriv upadali. Realni rezultati dvajsetletnega poskusa prehoda proti OVE so ravno nasprotni. Več o tem v nadaljevanju.

Trajnost in trajnostni razvoj

Trajnost je koncept, ki se nanaša na sposobnost posameznikov, skupnosti in celotne družbe, da delujejo na način, ki dolgoročno ne izčrpa naravnih virov in ne ogroža prihodnjih generacij. Pomeni ravnovesje med gospodarskim razvojem, družbeno blaginjo in varovanjem okolja. Trajnost vključuje odgovorno rabo virov, zmanjšanje škodljivih vplivov na okolje ter ustvarjanje pogojev za kakovostno življenje tako danes kot v prihodnosti.

Besedo trajnost pa se pogostokrat uporablja v povezavi z razvojem, izraza se pogosto uporablja za isto stvar. UNESCO oba razlikuje sledeče:

»Trajnost se pogosto obravnava kot dolgoročni cilj (tj. bolj trajnosten svet), medtem ko se trajnostni razvoj nanaša na številne procese in poti za njegovo doseganje.«^[1]

(Unesco, 2015)

Obstaja veliko definicij trajnostnega razvoja, glede na literaturo, kontekst in čas. Najpogosteje citirana definicija pa je slednja iz poročila komisije norveške političarke:

»Trajnostni razvoj zadovoljuje potrebe sedanjega človeškega rodu, ne da bi ogrozili možnosti prihodnjih rodov, da zadovoljijo svoje potrebe.«^[2]

(Gro Harlem Brundtland, 1987)

Koncept trajnosti temelji na treh ključnih stebrih: ekonomski, socialni in okoljski trajnosti. Prva zagotavlja dolgoročno gospodarsko rast, ki temelji na učinkovitosti in inovacijah, brez uničevanja naravnih virov ali povzročanja gospodarskih neravnovesij. Socialna je usmerjena v enakopravnost, pravičnost in kakovost življenja vseh ljudi, vključno z dostopom do izobraževanja, zdravstva, zaposlitvenih možnosti ter socialne varnosti. Okoljska, pa pomeni varovanje naravnega okolja, zmanjšanje onesnaževanja, prehod na OVE in odgovorno ravnanje z viri, da se prepreči degradacija ekosistemov. S trajnostnim razvojem naj bi se tudi ohranjala biološka raznovrstnost. Krovni pojem trajnostnega razvoja obsega še več drugih vidikov, ne nazadnje tudi možnosti razvoja vsakega človeka ali združbe, če ne škoduje drugim.

Podrobnosti o ekonomski razsežnosti trajnosti so precej sporne. Strokovnjaki o tem razpravljajo v okviru konceptov šibke in močne trajnosti. Vedno bo obstajala napetost med prizadevanji za blaginjo in gospodarsko rast ter potrebo po ohranjanju okolja, zato so določeni kompromisi neizogibni. Idealno bi bilo najti načine, kako ločiti gospodarsko rast od negativnih vplivov na okolje, torej zmanjšati porabo virov na enoto proizvodnje in hkrati še naprej spodbujati razvoj. Temu pravimo "decoupling" oziroma ločevanje gospodarske rasti od okoljskega škodovanja, vendar je to v praksi izjemno zahtevno. Nekateri strokovnjaki celo trdijo, da ni dokazov, da bi se to res dogajalo v zadostnem obsegu.

Trajnost je težko meriti, saj gre za kompleksen in dinamičen koncept. Obstajajo različni kazalniki, ki zajemajo okoljski, družbeni in ekonomski vidik, vendar ni enotne definicije, kaj vse bi moralo biti vključeno. Merila in standardi trajnosti se nenehno razvijajo, za vključujejo različne certifikate, kot sta Fairtrade in certifikati o organski proizvodnji (glej sliko 1), ki pa so lahko zavajajoči, zlahka na trgovskih policah. Standardno pa je tudi trajnostno poročanje podjetij ali koncept "trojnega dna" (Triple Bottom Line), ki upošteva ekonomske, okoljske in socialne učinke poslovanja. Veliko podjetij je v zadnjih letih začelo na svoje spletne strani, letake in brošure vključevati informacije o svojem prispevku k trajnosti. Pogosto poudarjajo, kako pomembno se jim zdi varovanje okolja, ter navajajo ukrepe, s katerimi naj bi k temu prispevali. Po eni strani je to pozitiven premik, saj se vedno več podjetij zaveda pomena trajnostnega delovanja. Po drugi strani pa se lahko zgodi, da gre le za marketinško strategijo ali celo

namerno zavajanje strank, znano kot "greenwashing", ko podjetja navzven ustvarjajo vtis trajnosti, v resnici pa ne sprejemajo bistvenih ukrepov za varovanje okolja. Zato je pri takšnih trditvah vedno pomembno preveriti, ali imajo podjetja za svoje izjave konkretne dokaze in certifikate ali gre zgolj za lepo zapakirane besede.



Slika 1: Certifikati organske proizvodnje. Še ne pomeni, da je izdelek bil proizveden na trajnosten način.

[viri slik: <https://www.ekioglas.ba/edukacija/178/kako-znati-sta-je-pravi-organski-proizvod-prilikom-kupovine> ;
<https://kadaly.com/en/blogs/green/> ; <https://www.organskakontrola.ba/page/onama.php>]

Da bi dejansko dosegli prehod v bolj trajnostno družbo, se moramo spopasti s številnimi ovirami. Nekatere izhajajo iz naravnih omejitev in kompleksnosti ekosistemov, druge pa so posledica obstoječih družbenih, ekonomskih in političnih struktur. Globalni trajnostni izzivi so še posebej zahtevni, saj zahtevajo usklajene rešitve in sodelovanje na mednarodni ravni. Organizacije, kot sta Združeni narodi (v nadaljevanju ZN) in Svetovna trgovinska organizacija (v nadaljevanju WTO), so pogosto kritizirane zaradi svoje neučinkovitosti pri uveljavljanju trajnostnih ciljev, predvsem zaradi pomanjkanja učinkovitih mehanizmov sankcioniranja za tiste, ki ne spoštujejo okoljskih dogovorov. Vendar pa trajnost ni le naloga vlad. Podjetja igrajo ključno vlogo pri prehodu v bolj trajnostno gospodarstvo, od zmanjšanja ogljičnega odtisa in uporabe obnovljivih virov energije do razvoja trajnostnih izdelkov in krožnega gospodarstva. Poleg tega tudi nevladne organizacije, lokalne skupnosti in verski voditelji opozarjajo na pomen varovanja narave in družbene odgovornosti. Nenazadnje pa lahko vsak posameznik prispeva k bolj trajnostnemu načinu življenja, bodisi s premišljenim potrošništvom, zmanjšanjem odpadkov ali izbiro okolju prijaznejših alternativ v vsakdanjem življenju. Kljub vsem prizadevanjem se pojavljajo tudi kritike. Nekateri menijo, da je trajnost pogosto le marketinška fraza, ki jo podjetja in politike izrabljajo za izboljšanje svoje podobe, brez resničnih sprememb. Drugi opozarjajo, da je popolna trajnost morda celo nedosegljiv cilj, saj današnja družba temelji na nenehni gospodarski rasti, ki pogosto nasprotuje ohranjanju naravnih virov. Strokovnjaki pa poudarjajo, da trenutno ni države, ki bi svojim prebivalcem zagotavljala vse, kar potrebujejo, ne da bi pri tem preseгла planetarne meje in izčrpavala naravne vire.

Poznamo tudi pojem zeleni razvoj, ki se na splošno razlikuje od trajnostnega razvoja v tem, da daje prednost okoljskim ciljem pred gospodarskimi in družbenimi vidiki. Zagovorniki trajnostnega razvoja poudarjajo, da trajnostni pristop omogoča uravnoteženje različnih potreb ter zagotavlja okvir za dolgoročno vzdržnost, medtem ko naj bi bil pri zelenem razvoju ta cilj težje dosegljiv. Na primer, vrhunska tovarna z izjemno visokimi stroški vzdrževanja ni smiselna v regijah z omejenimi finančnimi sredstvi. Čeprav bi bila okoljsko idealna, bi lahko zaradi prevelikih stroškov propadla, kar bi imelo negativen učinek tako na skupnost kot na gospodarstvo. Boljša rešitev bi bila tovarna, ki jo skupnost lahko vzdržuje, tudi če ni popolnoma ekološko učinkovita. Pojem trajnosti se pogosto povezuje z idejo, da je okolje preplet narave in kulture. Na primer, evropska raziskovalna mreža "Trajnostni razvoj v raznolikem svetu" združuje različne znanstvene discipline in kulturno raznolikost obravnava kot ključno sestavino trajnostnih strategij. Po drugi strani pa nekateri raziskovalci vidijo okoljske in socialne izzive kot priložnosti za inovacije in razvoj. To še posebej velja v okviru koncepta trajnostnega podjetništva, ki išče inovativne in podjetniške rešitve za globalne izzive. Ta pogled se vse bolj uveljavlja tudi v poslovnem izobraževanju in na univerzah. Trajnostni razvoj je širok in prilagodljiv koncept, ki vključuje različne pristope, kot so šibka in močna trajnost ter ekologija. Hkrati pa se v razpravah o trajnosti

pogosto pojavljata nasprotujoča si pogleda: t.i. ekocentrizem, ki daje prednost naravi, in antropocentrizem, ki postavlja človeka v središče razvoja. Kljub številnim opredelitvam trajnostnega razvoja pa ostaja osrednje vodilo enako: sedanji razvoj mora upoštevati dolgoročno ravnovesje med rabo naravnih virov, gospodarsko rastjo in blaginjo družbe, da bi zagotovili kakovostno življenje tudi prihodnjim generacijam. V zadnjih desetletjih so številne organizacije razvile različne sisteme za merjenje trajnosti, vključno z različnimi kazalniki, indeksi in standardi. Kljub temu ostaja vprašanje, ali trajnostni razvoj resnično postavlja omejitve za države v razvoju. Medtem ko so razvite države v preteklosti močno onesnaževale okolje v procesu svojega industrijskega razvoja, zdaj spodbujajo manj razvite države, naj zmanjšajo svoj ekološki odtis – pogosto brez zagotovitve ustreznih alternativ. To lahko včasih zavira njihov gospodarski napredek, kar sproža vprašanja o pravičnosti in enakopravnosti v globalni trajnostni politiki. Poleg teh izzivov se pojavljajo tudi kritike samega koncepta trajnosti. Nekateri menijo, da je beseda "trajnost" postala zgolj modna fraza, ki se uporablja v preveč različnih kontekstih, pogosto brez konkretnih ukrepov, kot je že pred tremi desetletji opozoril Stanley Temple, profesor na Univerzi v Wisconsinu:

»Besedo trajnost uporabljajo danes v preveč primerih, kar ustvarja zmedo. Slišali ste za trajnostni razvoj, trajnostno rast, trajnostna gospodarstva, trajnostne družbe, trajnostno kmetijstvo. Vse je trajnostno.« ^[3]

(Stanley Temple, 1992)

Kljub tem pomislekom ostaja trajnostni razvoj ključni koncept za prihodnost, saj si svet prizadeva uravnovežiti gospodarske, družbene in okoljske cilje ter zagotoviti dolgoročno blaginjo za vse.

Viri: [1][2][3][5][6][9][19][28][29][30]

Kakšna je rešitev?

Globalna rešitev za trajnostni razvoj ni preprosta in enostavna, saj izzivi, s katerimi se soočamo, segajo na različna področja, od podnebnih sprememb in onesnaževanja do socialnih neenakosti in gospodarskih težav. Kljub temu pa obstajajo ključne smernice, ki bi lahko pripomogle k prehodu v bolj trajnostno prihodnost, če se izvedejo na globalni ravni.

Ena od pomembnih poti je mednarodno sodelovanje. Globalni sporazumi, kot je Pariški sporazum o podnebnih spremembah ali trajnostni cilji ZN (Agenda 2030), ponujajo okvire za usklajeno delovanje držav. Povečanje pritiska na države, da spoštujejo te cilje, bo zagotovo pripomoglo k doseganju večje trajnosti, vendar pa so potrebni tudi bolj učinkoviti mehanizmi sankcioniranja, da bi zagotovili, da vse države resnično upoštevajo dogovore in nikakor ne odstopajo od sporazuma. Prav tako bi morali mednarodni organi delovati hitreje in učinkoviteje pri sprejemanju in izvajanju odločitev, ki so ključne za obvladovanje globalnih izzivov, kot so podnebne spremembe, onesnaževalci in zaščita biotske raznovrstnosti. Prehod na krožno gospodarstvo predstavlja drugo pomembno smer. V tradicionalnem, linearnem gospodarstvu so naravni viri obravnavani kot potrošniški material, ki se po uporabi zavrže. Krožno gospodarstvo pa temelji na načelu, da se materiali in izdelki ponovno uporabijo in reciklirajo. To bi zmanjšalo potrebo po novih naravnih virih in zmanjšalo količino odpadkov, hkrati pa spodbudilo inovacije v načinu proizvodnje in uporabe virov. Prehod v tovrstni sistem zahteva spremembo tako v poslovnih modelih podjetij kot tudi v potrošniških navadah. Energetski prehod je prav tako ključnega pomena. Zdajšnja odvisnost od fosilnih goriv je eden glavnih dejavnikov podnebnih sprememb in okoljske degradacije. Hitrejša preusmeritev na obnovljive vire energije, kot so sončna, vetrna, hidro in geotermalna energija, je nujna, če želimo zmanjšati emisije toplogrednih plinov in

zagotoviti trajnostni vir energije za prihodnost. Na to področje se bom še podrobneje usmerila v nadaljevanju. Tudi večja energetska učinkovitost v industriji, stavbah in prometu je pomemben korak k trajnostnemu razvoju. K temu je treba dodati tudi trajnostno kmetijstvo in prehranske sisteme, ki se osredotočajo na zmanjšanje škodljivih vplivov na okolje, kot so pretirana uporaba pesticidov in umetnih gnojil ter prekomerno izkoriščanje naravnih virov. Pomembno je, da si prizadevamo za večjo lokalno pridelavo hrane, zmanjšamo količini zavržene hrane in izboljšamo rabo kmetijskih zemljišč. Prav tako bi morali preiti k bolj zdravim in manj onesnaževalnim prehranskim praksam, ki temeljijo na rastlinskih virih in trajnostnih kmetijskih tehnikah. Ob tem ne smemo pozabiti na spremembo potrošniških navad, saj imajo posamezniki velik vpliv na trajnostni razvoj. Vzgoja ljudi, da postanejo bolj ozaveščeni o vplivu svojega življenjskega sloga na okolje, je izredno pomembna. To pomeni spodbujanje odgovornega nakupovanja, zmanjšanje potrošnje in zavračanje nepotrebnih odpadkov. Potrošniške navade, ki podpirajo trajnostna podjetja in produkte z ekološkimi certifikati, so pomemben del prehoda v trajnostno družbo. Kot sem že prej omenila, vloga podjetij je tudi ključna. Podjetja morajo prevzeti odgovornost za svoj okoljski in socialni vpliv. To pomeni, da ne gre zgolj za iskanje profita, temveč tudi za iskanje trajnostnih poslovnih modelov, ki ne škodujejo okolju in družbi. Aktivno lahko prispevajo k trajnostnemu razvoju z uporabo ekoloških tehnologij, recikliranjem virov in zmanjšanjem emisij ter z zagotavljanjem pravičnih delovnih pogojev za svoje zaposlene. Poleg tega pa morajo tudi finančne institucije igrati pomembno vlogo pri usmerjanju investicij v trajnostne projekte. Zeleni skladi, trajnostni naložbeni portfelji in etične banke so primeri, kako lahko finančni sektor pomaga usmerjati kapital v projekte, ki so usmerjeni v dolgoročno trajnost. Žal je na svetu tako, da področje ekonomije nadvlada vse ostale, zato je ta sektor še tako pomemben.

Vse to pa zahteva spremembo našega globalnega gospodarstva in družbenih struktur. Ni dovolj, da posamezne države ali podjetja sprejmejo trajnostne prakse, potrebna je globalna usklajenost. Različni regionalni in nacionalni okviri se morajo uskladiti, da bi dosegli globalni prehod v trajnostno družbo. Hkrati moramo zagotoviti, da prehod ne bo vplival negativno na najrevnejše države, ki morda nimajo enakih možnosti za prehod v trajnostno gospodarstvo. Trajnostni razvoj mora biti pravičen in vključujoč za vse. Na koncu pa je treba opozoriti, da trajnostni razvoj ni enostaven cilj. Obstoječi izzivi so velikanski, a nujno potrebni, če želimo zagotoviti boljšo prihodnost za prihodnje generacije. Popolna trajnost je morda težko dosegljiva, vendar pa vsak korak k bolj trajnostni družbi prinaša pomemben napredek. Edini način, da dosežemo trajnostno prihodnost, je, da delujejo vsi narodi skupaj kot globalna skupnost, s spoštovanjem naravnih virov, odgovornim ravnanjem z njimi in hkratnim izboljšanjem kakovosti življenja vseh ljudi na tem planetu.

Če se sedaj osredotočim na Slovenijo, glede na Analizo trajnostnega razvoja^[4] lahko povzamem, da ključni izzivi trajnostnega razvoja vključujejo več pomembnih področij. Na področju ekonomske konkurenčnosti, čeprav je Slovenija po bruto domačem proizvodu (v nadaljevanju BDP) na prebivalca vodilna med primerljivimi državami, zaostaja v produktivnosti in njeni rasti. Nizka dodana vrednost na zaposlenega omejuje možnosti za višje plače in boljše financiranje javnih storitev. Na področju inovativnosti se Slovenija, kljub relativno visokim vlaganjem v raziskave in razvoj, sooča z "begom možganov" ter nezadostnim sodelovanjem med akademsko sfero in gospodarstvom. Potrebna je strategija za spodbujanje inovacij in privabljanje tujih investicij v raziskovalno-razvojne dejavnosti. Okoljska trajnost predstavlja še en izziv, saj je Slovenija dosegla napredek pri ravnanju z odpadki, vendar se sooča z izzivi na področju energijske predelave odpadkov. Potrebno je povečati delež energije iz obnovljivih virov ter izboljšati energetska učinkovitost. Socialna trajnost je prav tako pomembna, saj staranje prebivalstva predstavlja velik izziv, ker se bodo javni izdatki za pokojnine, zdravstvo in dolgotrajno oskrbo v prihodnosti povečali. Pomanjkanje usposobljene delovne sile je velik problem, ki ga je potrebno nasloviti z ustreznimi izobraževalnimi programi in prilagoditvami politik na trgu dela.

Kljub tem izzivom ima Slovenija številne priložnosti za trajnostni razvoj. Na področju človeškega kapitala država izstopa z visokim deležem izobraženega prebivalstva, kar ustvarja velik potencial za inovacije. Naravni viri predstavljajo še eno prednost, saj Slovenija ohranja bogato naravno okolje in ponuja velik potencial za trajnostni turizem. Članstvo v Evropski uniji omogoča dostop do evropskih skladov in programov, ki podpirajo trajnostne projekte. Ključne usmeritve za trajnostni razvoj vključujejo naložbe v izobraževanje, raziskave in razvoj, kar bo pripomoglo k večji konkurenčnosti in inovativnosti. Spodbujanje sodelovanja med akademskim sektorjem in gospodarstvom je nujno za prenos znanja in tehnologij. Vlaganje v zelene tehnologije in obnovljive vire energije bo pomagalo zmanjšati emisije in doseči podnebne cilje. Razvoj krožnega gospodarstva bo povečal učinkovitost rabe virov in zmanjšal količino odpadkov. Prav tako bo potrebno izboljšati poslovno okolje, privabiti tuje investicije in spodbuditi trajnostno proizvodnjo ter potrošnjo. Socialna kohezija in zmanjšanje neenakosti v družbi sta prav tako pomembna.

Slovenija se na mednarodnih lestvicah trajnostnega razvoja uvršča dokaj dobro. Na lestvici trajnosti držav je na 18. mestu od 150, na indeksu srečnega planeta pa na 38. mestu od 152. Kljub solidnim uvrstitvam pa Slovenija zaostaja na področju konkurenčnosti in inovativnosti. Za uspešno soočanje z izzivi trajnostnega razvoja bo nujno sodelovanje vseh deležnikov, vključno z vlado, gospodarstvom, civilno družbo in posamezniki. Slovenija je leta 2022 dosegla izjemne rezultate na Evropskem inovacijskem semaforju, kjer je v štirih ključnih kategorijah presegla povprečje EU. Na področju človeških virov je dosegla 140,2 % povprečja, kar kaže na visok inovacijski potencial prebivalstva. Uporaba informacijskih tehnologij, kjer je dosegla 126,1 % povprečja, kaže na močno digitalno infrastrukturo. Povezovanje med podjetji, raziskovalnimi institucijami in javnim sektorjem je pri nas na 142,3 % od povprečja EU. Prav tako je Slovenija v kategoriji inovatorjev dosegla 116,1 % povprečja. Kljub tem dosežkom pa še vedno soočamo z izzivi, kot so nizke investicije podjetij v raziskave in razvoj ter pomanjkljivo financiranje inovacij.

Analiza konkurence kaže, da Slovenija na globalni lestvici konkurentnosti zaseda 35. mesto, vendar se sooča z izzivi, kot so omejena svoboda delovanja, visoka poraba energije, onesnaževalni vplivi, nizka produktivnost in omejene tuje investicije. Kljub prednostim, kot so izobraženost in kakovost življenja, obstajajo slabosti, ki jih je treba nasloviti, kot so nižja stopnja inovativnosti, slaba poslovna klima in visoki stroški dela. Pomanjkanje usposobljenih kadrov v Sloveniji, kljub nizki stopnji brezposelnosti, je še en velik izziv. Strukturno neskladje med ponudbo in povpraševanjem na trgu dela, nizke plače in dolgotrajni postopki zaposlovanja so glavni razlogi za pomanjkanje kadrov. Vzrok za to je tudi beg možganov, kjer visoko usposobljeni kadri iščejo boljše možnosti v tujini. Da bi rešili to težavo, bi bilo treba prilagoditi izobraževalni sistem potrebam trga dela, optimizirati oz. uskladiti plače med poklici izboljšati delovne pogoje. Prav tako bi bilo treba poenostaviti postopke zaposlovanja tujcev in spodbujati vračanje kadrov iz tujine. Reševanje tega problema je ključno za zagotavljanje trajnostne gospodarske rasti in razvoja Slovenije.

Slovenija je na pravi poti, vendar pa kot sem že povedala, trajnostni razvoj ostaja globalen izziv, ki presega meje posameznih držav. Kot majhna država imamo lahko omejen vpliv na globalne spremembe, a lahko vendarle prispevamo k iskanju rešitev, zlasti na področju izobraževanja in inovacij. Slovenija, skupaj s severnoevropskimi državami, kot so Švedska, Danska in Finska, ter drugimi naprednimi evropskimi državami, lahko služi kot zgled drugim, predvsem v tem, kako pomembno je vlaganje v izobraževanje, znanost in trajnostni razvoj. Te države so že dokazale, da lahko dosežemo pomembne premike, če k trajnostnemu razvoju pristopimo z dolgoročno vizijo in celovitim sodelovanjem med vladami, gospodarstvom in civilno družbo. Slovenija lahko še naprej izkoristi svoj potencial za rast in inovacije, hkrati pa smo lahko v nekaterih pogledih zgled vsem državam, ki si prizadevajo za bolj trajnostno prihodnost.

Viri: [3][9][10][12][13][19][20][21][24][27]

Trajnostni viri energije in elektroenergetski sistem

Trajnostni viri energije postajajo ključni dejavnik pri oblikovanju energetske prihodnosti, saj globalno segrevanje in okoljske spremembe vse bolj vplivajo na naše življenje. Energetski sektor se sooča z nujno potrebo po prehodu na obnovljive in lokalne vire energije, ki ne zagotavljajo le zmanjšanja emisij toplogrednih plinov, temveč tudi večjo energetske varnost. Evropska unija si v svojih strategijah prizadeva za celovit pristop k vprašanju trajnostnega razvoja, pri čemer daje poudarek tudi povezanim področjem, kot so voda, hrana, energija, izobraževanje in zdravo bivalno okolje. Kljub temu pa povečana uporaba obnovljivih virov energije odpira tudi številna vprašanja, med drugim vpliv na biotsko raznovrstnost ter zahteve po prilagodljivosti elektroenergetskega sistema. Za doseg ciljev podnebnih načrtov je prehod na OVE neizogiben – Evropska zakonodaja to jasno določa v dokumentih, kot so Direktiva o obnovljivih virih energije (Renewable Energy Directive oz. RED), Evropski zeleni dogovor (European Green Deal) in načrt REPowerEU. Na nacionalnem nivoju v Sloveniji pa izvajanje teh strategij določa Nacionalni energetski in podnebni načrti (NEPN). Evropska unija si je zastavila ambiciozne cilje. Do leta 2030 želi doseči vsaj 55-odstotno zmanjšanje emisij toplogrednih plinov v primerjavi z letom 1990, v okviru paketa "Fit for 55" pa načrtuje, da bo do leta 2050 postala prva podnebno nevtralna celina.



Slika 2: »Fit for 55«.

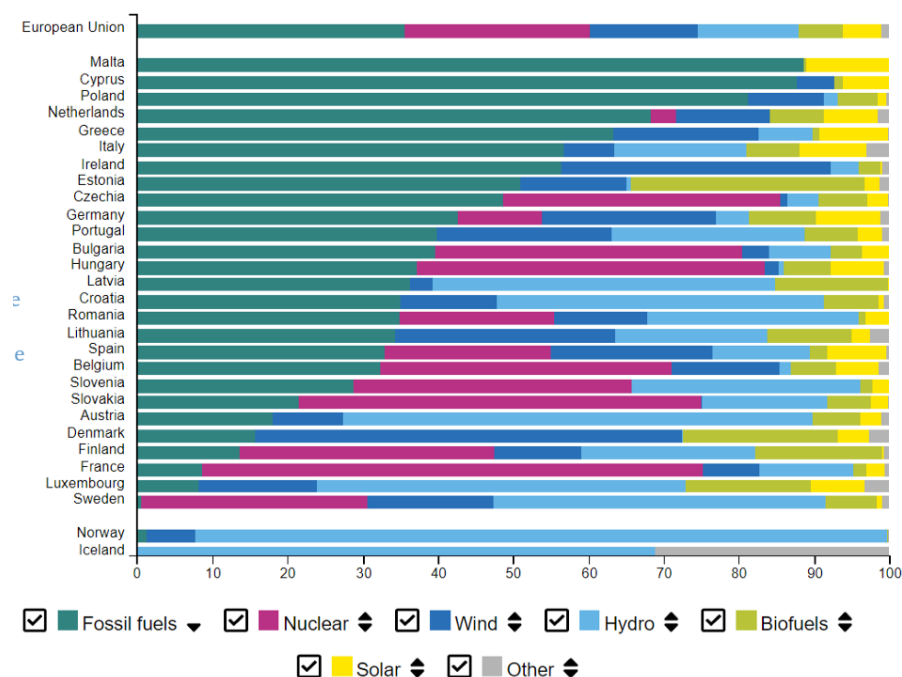
[vir: <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/links/fit-55>]

	 Slovenija	 EU	
CILJI 2030	NEPN 2020	Posodobitev NEPN 2024	
Podnebje			
Skupne emisije TGP <i>Zmanjšanje glede na leto 2005</i>	-36%	-55% 2033 -35% 2030	55%
Emisije TGP neETS	-20% (-15%)	28% (-27%)	-40%
Obnovljivi viri energije			
Delež OVE v bruto končni rabi	27%	33%	>42,5
Učinkovita raba energije			
Raba končne energije	54,9TWh	50,2 TWh -11,1%	-11,7%

Slika 3: Glavni cilji podnebno energetske politike NEPN.

[vir: <https://n1info.si/novice/slovenija/v-slovenskem-nacrtu-razogljudenja-tudi-nove-velike-hidroelektrarne/>]

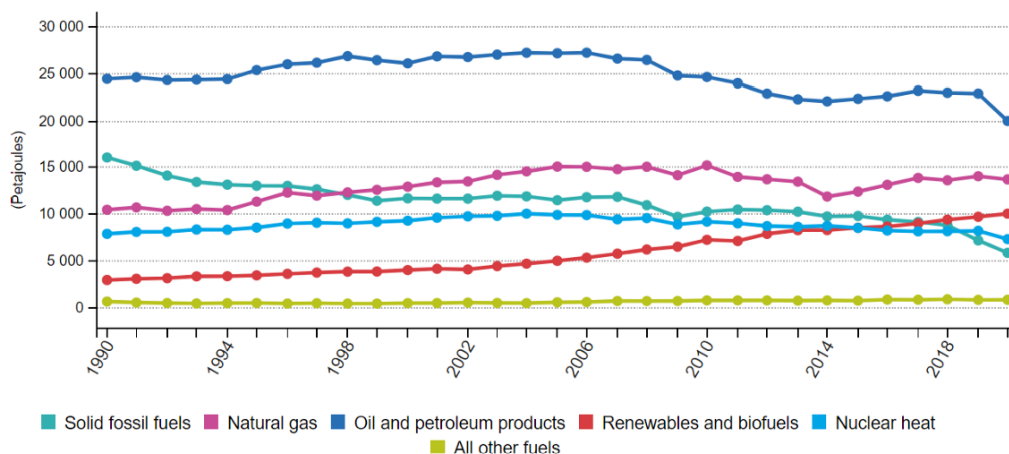
NEPN opredeljuje pet ključnih razsežnosti energetske politike: razogljudenje, energetska učinkovitost, energetska varnost, notranji trg energije ter raziskave, inovacije in konkurenčnost. Poleg tega obstaja vrsta drugih strateških dokumentov, ki usmerjajo energetske prihodnosti, vključno z nacionalno strategijo za izstop iz premoga, dolgoročno strategijo za prenovo stavb ter akcijskimi načrti za skoraj nič-energijske stavbe in obnovljive vire energije. Kljub vse večji vlogi OVE v elektroenergetskem sistemu ostajajo izzivi, povezani s stabilnostjo omrežja in fleksibilnostjo proizvodnje. Leta 2020 so obnovljivi viri na ravni EU prvič presegle fosilna goriva, saj so predstavljali 39 % celotne proizvodnje električne energije. Največji delež so imeli vetrne elektrarne (14 %), hidroelektrarne (13 %), biogoriva (6 %) in sončna energija (5 %).



Slika 4: Proizvodnja električne energije v EU glede na vir (v %).

[vir: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/info/graphs/energy/bloc3b.html?lang=en#:~:text=In%202020%20at%20EU%20level,came%20from%20nuclear%20power%20plants>]

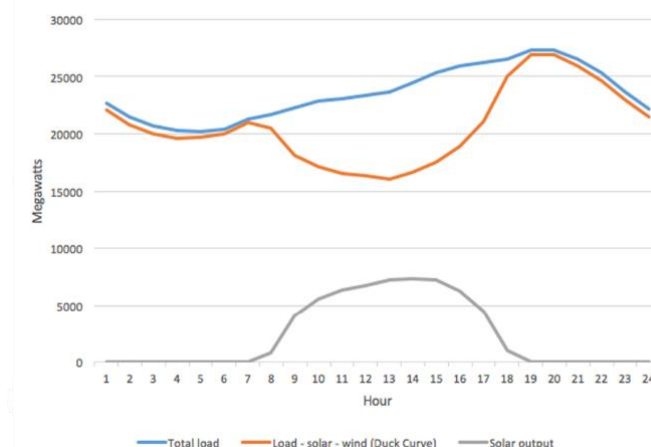
Razlikovati pa moramo med proizvodnjo in porabo električne energije, ter energije na splošno. Poraba energije v EU je še vedno v veliki meri odvisna od klasičnih virov, kot so fosilna goriva (nafta, premog, zemeljski plin) in jedrska energija. Ti viri imajo ključno vlogo v različnih sektorjih, kot so industrija, promet, ogrevanje in gospodinjstva. Pomembno je razlikovati med skupno porabo energije in porabo električne energije. Skupna poraba vključuje vse oblike energije, ki jih uporabljamo – od goriv za promet in ogrevanje do električne energije za industrijo in gospodinjstva. Po drugi strani pa poraba električne energije zajema samo tisti del energije, ki se uporablja v električni obliki, na primer za delovanje naprav, razsvetljavo in električna vozila. V EU električna energija predstavlja le del celotne porabe, preostanek pa večinoma prihaja iz neposredne rabe fosilnih goriv. Čeprav delež OVE pri proizvodnji elektrike raste, je prehod na čiste vire v drugih sektorjih, zlasti v prometu in ogrevanju, počasnejši. Zato je za doseg podnebnih ciljev ključna elektrifikacija teh sektorjev, hkrati pa tudi povečanje deleža obnovljivih virov v celotni energetski mešanici.



Slika 5: Poraba energije v EU, prevladujejo še vedno klasični viri.

[vir: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview]

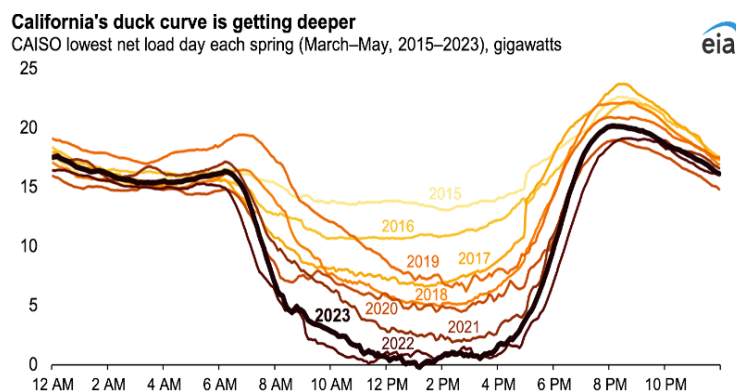
Če se navežem na sliko 4, je potrebno pri proizvodnji električne energije upoštevati tudi razpoložljivost virov in sposobnost prilagajanja sistemu, saj obnovljivi viri niso vedno enakomerno porazdeljeni skozi čas. Zaradi nepredvidljivosti obnovljivih virov je ključno uravnoteževanje porabe in proizvodnje energije. Operaterji elektroenergetskih sistemov uporabljajo različne strategije za zagotavljanje stabilnosti, vključno s sistemskimi storitvami, kot so frekvenčna regulacija, regulacija napetosti in črni zagon. Napovedovanje proizvodnje vetrnih in sončnih elektrarn ostaja izziv, saj lahko nepredvideni presežki sončne ali vetrne energije povzročijo tako imenovano omejevanje obnovljivih virov (curtailment). V Kaliforniji, kjer obnovljivi viri v določenih delih dneva pokrijejo celotno porabo, se soočajo s pojavom "duck curve", ki ponazarja nihanja v proizvodnji sončne energije tekom dneva.



Slika 6: Kalifornija proizvede 40 % elektrike iz OVE, v posameznih delih dneva pa 100%.

[vir: https://en.wikipedia.org/wiki/Duck_curve]

Običajno elektroenergetska podjetja ponoči zagotavljajo najmanjšo količino električne energije, saj večina potrošnikov spi. Zjutraj, ko se ljudje prebujejo in podjetja začnejo delovati, se proizvodnja poveča, vrhunec povpraševanja po energiji pa nastopi ob sončnem zahodu. Da bi delovala čim bolj učinkovito, elektroenergetska podjetja uporabljajo modele za napovedovanje povpraševanja in prilagajajo proizvodnjo. Vendar je pojav sončne energije prinesel izzive za te modele povpraševanja. Ker je proizvodnja sončne energije odvisna od Sonca, je njen vrhunec okoli poldneva, ko je skupno povpraševanje po električni energiji pogosto nižje. Posledično je proizvodnja elektrike večja, kot bi bilo potrebno, neto povpraševanje (skupno povpraševanje minus proizvodnja iz vetra in sonca) pa pade. Ko se bliža večer, neto povpraševanje spet naraste, medtem ko proizvodnja sončne energije upada. Zaradi tega nastane krivulja neto povpraševanja, ki spominja na obliko race, pri čemer postaja tako imenovana "račja krivulja" vsako leto bolj izrazita, saj se dodaja vedno več sončne zmogljivosti, kar povzroča še večji padec neto povpraševanja sredi dneva.



Slika 7: Račja krivulja v Kaliforniji vsako leto ratuje izrazitejša, dobiva obliko laboda.

[vir: <https://yousolar.com/updates/the-duck-becomes-a-swan/>]

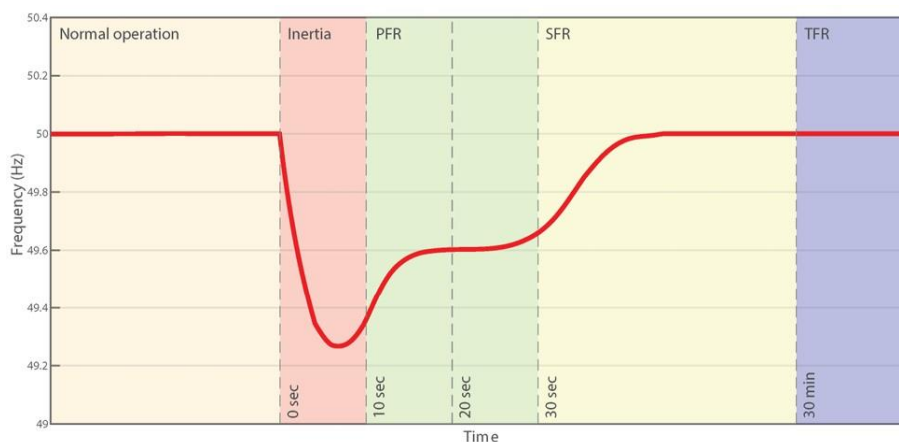
Problem račje krivulje pa ni omejen samo na Kalifornijo. Gre za globalen izziv, ki se pojavlja povsod, kjer se močno zanašajo na sončno energijo. Države, kot so Avstralija, Nemčija, Španija in Japonska, se prav tako soočajo s težavami zaradi presežne proizvodnje sredi dneva in pomanjkanja energije v večernih urah. Razlika je v tem, kako posamezne države obvladujejo ta problem. Nekatere vlagajo v shranjevanje energije (kot so baterije in črpalne hidroelektrarne), druge optimizirajo omrežje z boljšo regulacijo povpraševanja ali spodbujajo druge stabilne vire energije, kot so jedrske ali hidroelektrarne. Če se delež sončne energije še poveča brez ustreznih prilagoditev omrežja, bo račja krivulja postajala vedno bolj izrazita tudi v drugih delih sveta.

Račja krivulja pa predstavlja enega izmed največjih izzivov pri prehodu na OVE, zlasti sončno energijo. Njen pojav je posledica neskladja med proizvodnjo in porabo električne energije tekom dneva. To povzroča izrazita nihanja v neto povpraševanju po elektriki, kar predstavlja resen izziv za stabilnost elektroenergetskega sistema. Eden izmed problemov je potreba po hitrem povečanju proizvodnje električne energije ob sončnem zahodu, ko poraba doseže vrhunec, sončna energija pa ni več na voljo. To pomeni, da morajo elektroenergetska podjetja v zelo kratkem času aktivirati dodatne proizvodne kapacitete, kar pogosto povzroča preobremenitev omrežja, saj infrastruktura ni zasnovana za tako hitre spremembe v obremenitvi. Druga težava je povezana s tradicionalnimi viri energije, kot sta jedrska in premogovna energija, ki so zasnovani za neprekinjeno delovanje. Ti viri so ekonomsko vzdržni le, če obratujejo konstantno, saj njihova zaustavitev in ponovni zagon predstavljata velike stroške in operativne izzive. Če jih je treba izklopiti opoldne zaradi presežka sončne energije, postanejo manj konkurenčni, kar dodatno zapleta prehod na trajnostno energetiko. V nekaterih delih sveta, kot je Kalifornija, je račja krivulja že privedla do zavrnitve presežkov sončne energije, da bi preprečili preobremenitev omrežja. Težava je najbolj izrazita spomladi in poleti, ko je sončne energije največ. V teh obdobjih morajo operaterji omrežja včasih celo namerno izklopiti del sončnih panelov, da bi preprečili tveganje za stabilnost sistema. Rešitev te problematike zahteva razvoj in uvajanje različnih strategij. Ena izmed solidnih rešitev je shranjevanje presežkov energije, proizvedene podnevi. Napredne baterijske rešitve in izboljšana zmogljivost omrežnih hranilnikov omogočajo shranjevanje sončne energije za kasnejšo uporabo, kar pripomore k zmanjšanju nihanj v omrežju. Poleg shranjevanja energije je pomembna tudi alternativna uporaba presežkov sončne energije. Odvečna energija lahko služi za pogon hidroelektrarn prek črpalnih sistemov ali za segrevanje materialov, ki nato sproščajo energijo v obdobjih večje porabe. To omogoča boljšo izrabo obnovljivih virov in zmanjšuje potrebo po hitrih prilagoditvah v elektroenergetskem sistemu. Jedrska, hidroelektrarna in geotermalna energija lahko delujejo neprekinjeno in tako zapolnijo vrzel v proizvodnji, ki nastane pri sončni energiji. S kombinacijo različnih trajnostnih virov energije je mogoče oblikovati bolj stabilen in zanesljiv elektroenergetski sistem. Račja krivulja je eden izmed največjih izzivov pri prehodu na OVE, vendar razvoj naprednih tehnologij in celovito strateško načrtovanje omogočajo obvladovanje teh izzivov ter vzpostavitev bolj trajnostnega in stabilnega energetskega sistema v prihodnosti.

V Sloveniji delovanje elektroenergetskega sistema usklajujejo različni akterji, med njimi Borzen, Eles, Agencija za energijo in distribucijska podjetja (Elektro Ljubljana, Elektro Gorenjska, Elektro Maribor, Elektro Primorska, itd.). Njihova naloga je zagotoviti zanesljivo oskrbo z električno energijo ter učinkovito integracijo obnovljivih virov.

Za stabilno delovanje elektroenergetskega sistema je ključno nenehno ravnovesje med proizvodnjo in porabo električne energije. Ker električne energije ne moremo enostavno shranjevati v velikih količinah, morajo upravljavci omrežja nenehno prilagajati proizvodnjo glede na trenutne potrebe odjemalcev. Če pride do neravnovesja, se lahko frekvenca omrežja odkloni od nominalne vrednosti (v Evropi je to 50 Hz), kar lahko povzroči resne težave, vključno z izpadi električne energije. Da bi zagotovili stabilnost sistema, elektroenergetska podjetja uporabljajo različne systemske storitve, ki vključujejo regulacijo frekvence, napetosti in zagotavljanje rezervne energije za nujne primere.

Regulacija frekvence je ena najpomembnejših sistemskih storitev, saj zagotavlja, da se proizvodnja in poraba energije v vsakem trenutku ujemata. Delimo jo na tri ravni – primarno, sekundarno in terciarno. Primarna regulacija deluje v nekaj sekundah po odstopanju frekvence od nominalne vrednosti. Samodejno se aktivira prek frekvenčno vodenih generatorjev v elektrarnah. Vsaka elektrarna, ki sodeluje v primarni regulaciji, prispeva določen delež moči za stabilizacijo omrežja. Sekundarna regulacija deluje v nekaj deset sekundah do nekaj minutah. Namenjena je vzpostavitvi nominalne frekvence in ponovni vzpostavitvi rezervne moči v sistemu. Sodelujejo večje elektrarne, ki lahko hitro prilagodijo svojo proizvodnjo, ter sistemi za čezmejno izmenjavo energije med povezanimi elektroenergetskimi omrežji. Terciarna regulacija pa se aktivira po nekaj minutah in lahko traja tudi do več ur. Namenjena je dolgoročnejši stabilizaciji omrežja in nadomeščanju sekundarne regulacije. Terciarna rezerva lahko vključuje dodatne proizvodne vire (npr. hitro zagnane plinske turbine) ali začasno zmanjšanje porabe na strani večjih industrijskih odjemalcev.



Slika 8: Čas in frekvenca posameznih vrst frekvenčne regulacije.

[vir: https://www.researchgate.net/figure/The-subsequent-effects-of-primary-secondary-and-tertiary-frequency-regulation-after-an_fig1_344173010]

Vsaka vrsta elektrarne ima v elektroenergetskem sistemu drugačno vlogo. Tradicionalne termoelektrarne (premogovne, plinske in jedrske) so običajno namenjene zagotavljanju osnovne proizvodnje in terciarne regulacije, medtem ko hidroelektrarne in plinske turbine omogočajo hitro odzivanje na spremembe v omrežju. Obnovljivi viri, kot sta veter in sonce, prispevajo k proizvodnji električne energije, vendar njihova proizvodnja ni vedno predvidljiva, kar predstavlja dodaten izziv pri uravnavanju omrežja. S povečanjem deleža obnovljivih virov postaja ključna fleksibilnost elektroenergetskega sistema. To vključuje razvoj pametnih omrežij, hranilnikov energije (npr. baterijski sistemi in črpalne hidroelektrarne) ter prilagodljivo upravljanje porabe (tako imenovano odzivno povpraševanje). Z izboljšanjem teh mehanizmov bo elektroenergetski sistem postal odpornejši in prilagodljivejši, kar bo omogočilo učinkovitejšo integracijo obnovljivih virov energije.

Viri: [5][9][10][12][13][19][21][24][31][33][34]

Obnovljivi viri energije

V dobi podnebnih sprememb in naraščajočega povpraševanja po energiji se vse več pozornosti namenja iskanju alternativnih energetskih virov, ki bi lahko nadomestili fosilna goriva. Pogosto se uporabljata izraza "obnovljivi viri energije" (OVE) in "trajnostni viri energije", vendar njuna pomena nista povsem enaka. Ključna razlika med njima je v tem, da obnovljivi viri energije temeljijo na naravni obnovljivosti, medtem ko trajnostni viri energije upoštevajo širši okoljski, družbeni in ekonomski vpliv.

Obnovljivi viri energije: naravno obnovljajoči viri

Obnovljivi viri energije so tisti, ki se naravno obnovljajo in so na voljo v človeškem časovnem okviru. Mednje uvrščamo sončno energijo, vetrno energijo, hidroenergijo, geotermalno energijo in biomaso. Ti viri se ne izčrpajo na enak način kot fosilna goriva, saj jih naravni procesi neprestano obnovljajo. Vendar pa dejstvo, da je nek vir obnovljiv, še ne pomeni, da je tudi trajnosten. Nekateri obnovljivi viri imajo lahko negativne vplive na okolje in družbo. Na primer, prekomerno izkoriščanje biomase lahko povzroči krčenje gozdov in izgubo biotske raznovrstnosti, velikopotezne hidroelektrarne lahko spremenijo naravni tok rek in vplivajo na ekosisteme, medtem ko lahko nepravilna postavitev vetrnih elektrarn povzroči motnje v živalskih populacijah.

Spremenljivi obnovljivi viri energije so tisti, katerih proizvodnja niha, kot sta vetrna in sončna energija. Nasprotno so vodljive obnovljive energije tiste, ki jih je mogoče nadzorovati, na primer hidroenergija, bioenergija in geotermalna energija.

Trajnostni viri energije: dolgoročna sprejemljivost

Trajnostni viri energije niso le obnovljivi, temveč tudi zasnovani tako, da imajo minimalen negativni vpliv na okolje, družbo in gospodarstvo. Trajnost pomeni, da določen vir energije lahko uporabljamo na dolgi rok, ne da bi pri tem povzročali nepovratno škodo ekosistemom ali zmanjševali kakovost življenja prihodnjih generacij. V tem kontekstu je na primer jedrska energija pogosto predmet razprav. Medtem ko jedrske elektrarne proizvajajo zelo malo emisij toplogrednih plinov in lahko zagotavljajo stabilno oskrbo z energijo, so vprašanja ravnanja z radioaktivnimi odpadki in morebitnih nesreč pomembni dejavniki, ki vplivajo na njeno trajnost. Prav tako nekateri obnovljivi viri, kot je pretirana raba biomase brez ustrezne regulacije, niso nujno trajnostni, saj lahko vodijo v okoljsko degradacijo.

Razlikovanje med obnovljivimi in trajnostnimi viri energije je ključno za oblikovanje energetske politike in strategij prehoda v nizkoogljično družbo. Medtem ko je spodbujanje OVE pomembno za zmanjšanje odvisnosti od fosilnih goriv, je prav tako nujno da se vprašamo ali so ti viri trajnostni v vseh vidikih. To pomeni skrb za ekološko ravnovesje, pravično razporeditev virov in ekonomsko vzdržnost na dolgi rok. V prihodnosti bo pomembno, da energetski prehod ne temelji zgolj na povečanju deleža OVE, temveč tudi na njihovem trajnostnem upravljanju. To bo vključevalo razvoj naprednih tehnologij, boljše strategije shranjevanja energije in celostno načrtovanje, ki bo vključevalo okoljske in družbene vidike. Le tako bomo lahko zagotovili energetski sistem, ki bo prijazen do planeta in prihodnjih generacij.

OVE pogosto nadomeščajo konvencionalna goriva na štirih področjih: proizvodnja električne energije, ogrevanje vode in prostorov, prevoz ter oskrba podeželskih (izven omrežja) energetskih sistemov. Obnovljivi energetski sistemi so v zadnjih 30 letih postali veliko bolj učinkoviti in cenejši. Velika večina novo nameščene proizvodne zmogljivosti električne energije na svetu je zdaj obnovljiva. Viri, kot sta sončna in vetrna energija, so v zadnjem desetletju doživeli znatno znižanje stroškov, zaradi česar so konkurenčnejši fosilnim gorivom. V večini držav sta fotovoltaika in vetrna energija na kopnem najcenejša vira za novogradnje elektrarn. Med letoma 2011 in 2021 se je delež OVE v svetovni oskrbi z električno energijo povečal iz 20 % na 28 %.^[9] Večino te rasti sta prispevala sončna in vetrna energija, ki sta skupaj narasli z 2 % na 10 %.^[9] V istem obdobju se je delež fosilnih goriv zmanjšal s 68 % na 62 %.^[9] Leta 2022 so OVE predstavljali 30 % svetovne proizvodnje električne energije, do leta 2028 pa naj bi dosegli več kot 42 %.^[9] Številne države že zdaj več kot 20 % svoje skupne porabe energije pridobivajo iz obnovljivih virov, nekatere pa proizvajajo več kot polovico ali celo vso elektriko iz obnovljivih virov.^[9]

Čeprav skoraj vse oblike obnovljive energije povzročijo bistveno manj emisij ogljikovega dioksida kot fosilna goriva, ta izraz ni enak pojmu nizkoogljična energija. Nekateri neobnovljivi viri, kot je jedrska

energija, proizvedejo skoraj nič emisij, medtem ko so lahko nekateri obnovljivi viri, kot je sežiganje biomase, zelo ogljično intenzivni, če niso ustrezno uravnoreženi z nadomestnim pogozdovanjem. Prav tako se obnovljiva energija razlikuje od trajnostne energije, saj trajnostna energija zajema vire, ki dolgoročno ne obremenjujejo prihodnjih generacij. Na primer, biomasa je pogosto povezana z netrajnostnim krčenjem gozdov.

V sklopu globalnih prizadevanj za omejevanje podnebnih sprememb se je večina držav zavezala k doseganju neto nič emisij toplogrednih plinov. V praksi to pomeni postopno opuščanje fosilnih goriv in njihovo nadomeščanje z nizkoogljičnimi viri energije. Ta proces, imenovan "nizkoogljični prehod", se mora večkrat pospešiti, da bi uspešno omilili podnebne spremembe. Na Konferenci Združenih narodov o podnebnih spremembah leta 2023 se je približno tri četrtine držav zavezalo k potrojitvi zmogljivosti OVE do leta 2030. Evropska unija si prizadeva, da bi do takrat 40 % električne energije proizvedla iz obnovljivih virov.

Obnovljivi viri energije so enakomerneje razporejeni po svetu kot fosilna goriva, ki so skoncentrirana v nekaj državah. Poleg tega obnovljivi viri prispevajo k izboljšanju zdravja, saj zmanjšujejo onesnaževanje zraka, ki ga povzroča izgorevanje fosilnih goriv. Po ocenah bi lahko s prehodom na obnovljivo energijo prihranili na tisoče milijard dolarjev letno v stroških zdravstvene oskrbe. Sončna in vetrna energija sta najpomembnejši obliki obnovljive energije, vendar sta spremenljivi in nista na voljo neprekinjeno, kar povzroča nižje faktorje zmogljivosti. Fosilne in jedrske elektrarne ter hidroelektrarne lahko po drugi strani natančno prilagodijo proizvodnjo glede na povpraševanje po električni energiji. Sončna energija je na voljo le podnevi in v optimalnih pogojih brez oblakov, medtem ko vetrna energija niha iz dneva v dan in celo iz meseca v mesec. To predstavlja izziv pri prehodu iz fosilnih goriv, saj lahko povpraševanje po energiji presega ali zaostaja za razpoložljivo količino energije iz obnovljivih virov. V srednjeročnem obdobju bo morda treba ohraniti nekatere plinske elektrarne ali druge prilagodljive proizvodne zmogljivosti, dokler ne bo na voljo dovolj kapacitet za shranjevanje energije, prilagajanje povpraševanja in izboljšanje elektroenergetskega omrežja. Na dolgi rok je shranjevanje energije pomembno za obvladovanje spremenljivosti obnovljivih virov. Razpršeni OVE in pametna omrežja lahko pomagajo uravnorežiti proizvodnjo in porabo.

Pri shranjevanju električne energije poznamo različne metode, ki omogočajo shranjevanje presežkov energije, ter njeno kasnejšo uporabo, ko je proizvodnja nižja od porabe. Več kot 85 % vse shranjene električne energije na omrežju temelji na hidroelektrarnah s črpalno shrambo. V zadnjem času se vedno bolj uveljavljajo tudi baterije za shranjevanje energije in pomožne storitve v elektroenergetskem omrežju. Zeleni vodik velja za bolj stroškovno učinkovito sredstvo za dolgoročno shranjevanje obnovljive energije v primerjavi s hidroelektrarnami s črpalno shrambo ali baterijami.

Dve glavni vrsti obnovljive energije - sončna in vetrna - se večinoma uvajata v razpršenem sistemu proizvodnje, kar prinaša specifične prednosti in tveganja. Ena glavnih skrbi je osredotočenost 90 % proizvodnih verig na eno državo (Kitajsko) v fotovoltaični industriji. Masovna namestitve sončnih inverterjev s funkcijami daljinskega nadzora povečuje tveganje za kibernetike napade, ki bi lahko onemogočili proizvodnjo električne energije iz milijonov posameznih sončnih panelov in s tem povzročili izpad stotine gigavatov električne moči v enem trenutku. Podobne grožnje so bile usmerjene tudi na vetrne elektrarne prek ranljivosti v njihovih sistemih za daljinsko upravljanje in spremljanje. Evropska direktiva NIS2 delno odgovarja na te izzive s širitvijo obsega kibernetike varnosti na trg proizvodnje energije.

Kljub hitremu razvoju tehnologij OVE, obstajajo ovire za trajnostno širitev. Med največjimi izzivi so subvencije za fosilna goriva, lobiranje obstoječih energetskih podjetij ter lokalno nasprotovanje zaradi rabe zemljišč za obnovljive energetske sisteme. Tako kot pri vseh oblikah rudarjenja tudi pri pridobivanju surovin, potrebnih za obnovljive tehnologije, prihaja do negativnih vplivov na okolje. Poleg tega, čeprav so večinoma trajnostni, nekateri obnovljivi viri energije niso v celoti trajnostni.

Viri: [1][3][5][6][14]

OVE v Sloveniji

Slovenija se pri uporabi nekaterih obnovljivih virov energije sooča s precejšnjimi omejitvami. Veter pri nas ne predstavlja pomembnega energetskega potenciala, saj so trenutno v obratovanju le tri vetrne elektrarne s skupno močjo okoli 4 MW. Nekaj območij z ugodnejšimi pogoji za izkoriščanje vetra se nahaja na 355 lokacijah, ki so del omrežja Natura 2000. Ker ta zaščitena območja obsegajo kar 37 odstotkov celotne površine države, so gradnja vetrnic in drugi posegi zaradi varovanja okolja tam prepovedani. Slovenija je svoj vodni potencial že skoraj v celoti izkoristila, saj je na voljo le še okoli 10% neizkoriščenih virov (približno 2 petajoule). Zaradi bogatih gozdnih površin se kot OVE pogosto uporablja lesna biomasa. Geotermalna energija pa v Sloveniji trenutno ne omogoča proizvodnje večjih količin električne energije. Čeprav se do leta 2050 predvideva stabilna poraba primarne energije, bo poraba električne energije občutno narasla, saj bo treba nadomestiti tako fosilne kot jedrske vire. Med obnovljivimi viri ima največji potencial sončna energija, pri čemer se kot najprimernejša tehnologija kažejo fotonapetostni moduli (PV). Vendar pa imata tako sončna kot vetrna energija nestanovitno proizvodnjo, saj sta odvisni od vremenskih razmer in ure v dnevu. Zaradi tega strokovna literatura te vire označuje kot spremenljive obnovljive vire energije (variable renewable energy – VRE). Ker se delež proizvodnje iz teh virov povečuje, postaja ključno vprašanje zagotavljanje vmesnega shranjevanja energije za stabilno oskrbo odjemalcev. Eden večjih tehnoloških izzivov zelenega prehoda je prav vzpostavitev zmogljivih sistemov za shranjevanje električne energije. Električna energija spada med prehodne oblike energije, saj je ne moremo neposredno skladiščiti. Trenutna rešitev te težave je pretvorba električne energije v druge oblike energije, ki jih je mogoče shraniti in kasneje uporabiti. Med tehnološko najzrelejšimi rešitvami za dolgoročno shranjevanje energije so črpalno-akumulacijske hidroelektrarne (v nadaljevanju ČHE), ki so primerne tudi za slovenske razmere. Čeprav so neto porabnice energije, omogočajo zadosten izkoristek, njihova moč pa lahko doseže raven GW, s kapacitetami skladiščenja vse do TWh. V Sloveniji od leta 2012 deluje ČHE Avče na reki Soči, ki ima moč 185 MW, skladiščno kapaciteto 2,4 GWh in izkoristek približno 75 odstotkov.

Viri: [4][5][7][11][39]

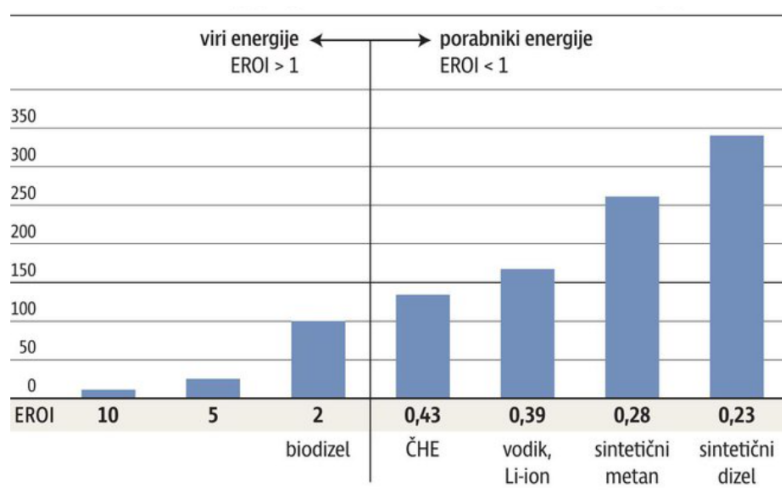
Sintetična goriva in obnovljiv ogljik

Ker nadomeščanje fosilnih goriv z električno energijo ni vedno izvedljivo ali smiselno, se predvideva omejena uporaba sintetičnih goriv, kot so vodik, sintetični metan in sintetično dizelsko gorivo. Sintetična goriva so umetno ustvarjena goriva, ki se proizvajajo s pomočjo kemijskih procesov, pri čemer se vodik kombinira z ogljikom, da se oblikujejo ogljikovodiki, podobni fosilnim gorivom. Njihova glavna prednost je, da so lahko ogljično nevtralna, če je ogljik pridobljen iz obnovljivih virov, a njihova proizvodnja zahteva velike količine energije. Eden najpogostejših postopkov za sintezo tekočih sintetičnih goriv je Fischer-Tropschev (v nadaljevanju FT) postopek, ki je izjemno energijsko potraten. Na primer, če namesto baterijskega električnega vozila (v nadaljevanju BEV) uporabljamo vozilo na sintetični dizel, se poraba primarne energije poveča kar za faktor 7,2^[6]. Zaradi te nizke učinkovitosti bi bilo smiselno, da se sintetična goriva uporabljajo predvsem za izredne storitve, kot so policijska, reševalna, gasilska in kmetijska vozila, medtem ko bi se večina prometa izvajala z električnimi vozili na baterije (BEV).

Za proizvodnjo sintetičnih goriv potrebujemo tudi ogljik, ki se lahko pridobi na več načinov. Ena možnost je zajem CO₂ iz industrijskih emisij, npr. iz proizvodnje cementa ali apna, kjer se ogljik naravno sprošča. Druga možnost je neposredno zajemanje CO₂ iz zraka (Direct Air Capture – DAC) ali morske vode. Tej tehnologiji se bom posvetila še v nadaljevanju. Pa vendar omenim, da so ti postopki

energetsko zelo intenzivni – za pridobivanje enega kilograma ogljika (kar ustreza 3,7 kg CO₂) iz zraka je potrebnih okoli 8 kWh energije, iz morske vode pa približno 6 kWh ^[6]. Takšno zajemanje ogljika se sicer predvideva v strategijah zelenega prehoda^[7], a ostaja vprašanje njegove dejanske energetske in ekonomske smiselnosti.

Pomembno je poudariti, da sintetična goriva in vodik niso primarni viri energije, temveč zgolj energijski vmesniki – to pomeni, da za njihovo proizvodnjo potrebujemo več energije, kot jo nato dobimo pri njihovi uporabi. Ključni pokazatelj tega je razmerje EROI (Energy Return on Investment), ki označuje, koliko uporabne energije dobimo glede na vloženo energijo. Če je EROI večji od 1, pomeni, da vir energije prinese več energije, kot je bilo potrebno za njegovo pridobivanje. Če pa je EROI manjši od 1, pomeni, da porabimo več energije, kot jo dobimo nazaj, kar dolgoročno ni trajnostno. Na primer: Biodizel ima razmeroma nizek EROI okoli 2, kar pomeni, da je vložena energija skoraj enaka razpoložljivi energiji po predelavi. Hranjenje energije v baterijah in črpalno-akumulacijskih hidroelektrarnah (ČHE) že zahteva več energije, kot jo nato dobimo nazaj, a se ti sistemi še vedno uporabljajo zaradi svoje vloge pri stabilizaciji elektroenergetskega sistema. Vodik ima vložek energije kar 166 % glede na razpoložljivo energijo, kar pomeni, da je potrebno več kot enkrat več energije za njegovo proizvodnjo, kot jo kasneje dobimo pri uporabi. Sintetični zemeljski plin ima še slabši izkoristek – za vsakih 100 enot energije, ki jih dobimo, moramo vložiti kar 260 enot energije^[6]. Sintetični dizel ali bencin je še manj učinkovit, saj je vložek energije kar 340 %, kar pomeni, da je potrebna več kot trikrat večja količina energije od tiste, ki jo dejansko dobimo pri uporabi goriva.



Slika 9: Vrsta goriva in njihov EROI (delež vložene energije glede na končno koristno energijo, v %).

[vir: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248471830266X>]

Čeprav sintetična goriva omogočajo uporabo obstoječe infrastrukture za goriva (bencinske črpalke, motorji z notranjim zgorevanjem), je njihova energetska neučinkovitost glavna ovira pri njihovi širši uporabi. Poleg tega njihova proizvodnja zahteva velike količine obnovljive energije, ki pa je še vedno omejena in bi jo bilo bolj smiselno neposredno uporabiti za elektrifikacijo prometa in industrije. Čeprav sintetična goriva lahko igrajo vlogo pri zeleni tranziciji, predvsem za sektorje, kjer elektrifikacija ni preprosta (npr. letalstvo in ladijski promet), jih ne moremo obravnavati kot univerzalno rešitev. Ključno bo, da se njihova uporaba optimizira in omeji na segmente, kjer resnično nimamo drugih alternativ.

Viri: [8][10][13]

Potrebe po energentih leta 2050

Kljub predpostavki, da bo rast porabe primarne energije do leta 2050 ostala na trenutni ravni, se bo poraba električne energije bistveno povečala. Razlog za to je postopno opuščanje fosilnih in jedrskih virov energije, ki jih bo treba nadomestiti z brezogljnimi alternativami. Na primer, če predvidevamo, da bo Slovenija dosegla vsaj 80-odstotno samooskrbo s hrano, bo to privedlo tudi do povečane porabe goriv v kmetijstvu – z zdajšnjih 70.000 ton na 140.000 ton tekočih sintetičnih goriv. V prometnem sektorju bo prehod potekal po več poteh. Sintetična goriva bodo uporabljena le za nujne službe (reševalci, gasilci, policija) in za tretjino mednarodnega tovornega prometa. Preostali dve tretjini tovornega prometa se bosta preusmerili na železnico, osebni promet pa bo večinoma elektrificiran. Tako bo 80 PJ (petajoulov) tekočih goriv nadomeščenih s približno 360.000 tonami sintetičnih goriv in 26,6 PJ električne energije.

Za popolno opustitev fosilnih goriv zgolj z obstoječimi tehnologijami bi bila potrebna temeljita sprememba v načinu proizvodnje in rabe energije. Pričakovanje, da bodo trenutne tehnologije, ki temeljijo na starih energetskih sistemih, prinesle preboj v energetske tranziciji, ni realno. Kot je dejal Einstein:

»Današnjih problemov ne moremo rešiti z enakim načinom razmišljanja, ki je te probleme ustvaril.«
(Albert Einstein, vir neznan)

To pomeni, da bo prehod na brezogljne vire zahteval razvoj in implementacijo povsem novih energetskih rešitev. Podobni izračuni veljajo tudi za druge sektorje. V industriji je predvideno, da se dve tretjini trenutne porabe zemeljskega plina nadomestita z električno energijo, preostala tretjina pa z vodikom. Pri sistemih daljinskega ogrevanja in nizkotemperaturnih procesih se bo v večji meri uporabljala geotermalna energija ter toplotne črpalke, ki omogočajo učinkovitejšo rabo energije. Predvideva se, da se bo današnja proizvodnja hidroelektrarn nekoliko povečala, na približno 5,5 TWh letno. Kljub temu bo za nadomeščanje fosilnih virov potrebna dodatna proizvodnja kar 52,4 TWh električne energije – kar je primerljivo s skupno proizvodnjo petih jedrskih elektrarn moči 1100 MW. Ker bo oskrba z OVE, kot sta sončna in vetrna energija, časovno nihala, bo ključnega pomena učinkovito skladiščenje električne energije. Po izračunih bo treba od skupno 57,9 TWh letno shraniti vsaj 70 % energije, kar pomeni, da bodo črpalno-akumulacijske hidroelektrarne (ČHE) igrale ključno vlogo pri stabilizaciji sistema. Pri upoštevanju njihovega 75-odstotnega izkoristka bo letna proizvodnja vseh virov morala znašati okoli 68,0 TWh. Od tega bodo izgube skladiščenja s ČHE predstavljale približno 10,1 TWh. Predvidena poraba 68 TWh električne energije pomeni, da se bo slovenska poraba več kot početverila glede na izhodiščno leto 2019. Takšen rezultat je v skladu z globalnimi analizami, ki kažejo, da bo za popolno nadomeščanje fosilnih goriv do leta 2050 svetovna poraba električne energije narasla do šestkratne vrednosti današnje.^[9]

Viri: [8][9][10][13]

Viri brezogljne električne energije v Sloveniji

Letna poraba električne energije v višini 68 TWh pomeni povprečno zahtevano moč približno 7,8 GW. Ker pa proizvodnja iz OVE, zlasti sončnih in vetrnih elektrarn, močno niha skozi leto, bodo za zagotavljanje stabilnosti omrežja potrebne velike instalirane moči in zmogljivi sistemi za shranjevanje energije. Izračun potrebne površine fotonapetostnih (PV) modulov temelji na območju Primorske, saj ima ta regija v Sloveniji najvišjo sončno obsevanost. Povprečna letna sončna obsevanost Slovenskega primorja znaša 3,94 kWh/m²/dan, kar na letni ravni pomeni približno 1,44 MWh/m² (ARSO). Če

upoštevamo povprečen izkoristek PV elektrarn, ki znaša 15 %, to pomeni, da en kvadratni meter fotonapetostnih modulov letno proizvede okoli 216 kWh električne energije. Za zagotovitev 62,5 TWh letne proizvodnje električne energije iz sončnih virov (upoštevajoč 5,5 TWh proizvodnje iz hidroelektrarn) bi bilo potrebnih približno 290 km² fotonapetostnih modulov. Ker moduli v praksi niso nameščeni idealno, bi bila dejanska potrebna površina še večja. Instalirana konična moč takšnih PV sistemov bi pri specifični moči 150 W/m² znašala okoli 43,4 GW, kar predstavlja približno 53 % trenutne instalirane PV moči v Nemčiji (81,8 GW; *Electricity Maps*).

Prehod na brezogljeno energetsko oskrbo izključno z znanimi OVE tehnologijami prinaša izjemno visoke stroške. Zaradi povečanega povpraševanja po obnovljivih virih energije se bo cena električne energije verjetno občutno zvišala, kar lahko negativno vpliva na gospodarsko rast. Če bi prišlo do stagnacije gospodarstva, bi tudi finančna sredstva za nadaljnje naložbe v obnovljive vire postala omejena, kar bi upočasnilo energetski prehod.

Viri: [4][9][13]

Izzivi sezonskega skladiščenja energije

Ena ključnih težav pri proizvodnji električne energije iz sonca je velika sezonska nihanja. V Slovenskem primorju je sončno obsevanje julija kar 5,6-krat večje kot decembra, kar pomeni, da bo treba presežke poletne proizvodnje učinkovito shranjevati za zimsko obdobje. Po ocenah bi bilo treba sistemsko skladiščiti vsaj 11 %, še bolje pa vsaj 15 % letne porabe električne energije (Kuštrin, I., Senegačnik, A.: Hypothetical Replacement of Slovenian Coal-Fired Thermal Power Plants with Photo-Voltaic Pumped-Storage Hydroelectric Power Plant, 19th SIMTERM conference, Serbia, 2019). To predstavlja približno 10,2 TWh shranjene energije – kar je 4200-krat več, kot znaša trenutna kapaciteta ČHE Avče. Ker količine vode, potrebne za takšno shranjevanje, presegajo vodnatost slovenskih rek, bi bila edina izvedljiva možnost sezonskega shranjevanja uporaba morja. Predlagana rešitev bi vključevala črpanje morske vode na Kraški rob, ki leži približno 400 metrov nad morjem in je od obale oddaljen približno 10 kilometrov. Pri takšni višinski razliki lahko en kubični meter vode shrani približno 1 kWh električne energije. Za shranitev 10,2 TWh bi bilo potrebno prečrpati 10,2 kubičnih kilometrov vode. To bi zahtevalo gradnjo ogromnega rezervoarja – okroglega zbiralnika premera 20,8 km in aktivne višine 30 metrov. Velikost tega rezervoarja bi bila izjemna, saj bi zasedal kar 1,7 % celotne površine Slovenije. V idealnem primeru bi lahko na njegovi gladini namestili plavajoče in rotirajoče fotonapetostne module, kar bi dodatno prispevalo k proizvodnji električne energije. Instalirana konična moč črpalk za ČHE bi znašala približno 43,4 GW, kar je kar 31-krat več od trenutne skupne moči slovenskih hidroelektrarn.

Viri: [4][13]

Zaključek poglavja

Letna poraba električne energije v Sloveniji znaša 68 TWh, kar pomeni povprečno moč približno 7,8 GW. Ker so OVE, kot sta sončna in vetrna energija, izredno nestanovitni, bo potrebna velika instalirana moč ter obsežna sistemska skladišča energije. Izračuni za sončne elektrarne temeljijo na podatkih za Primorsko, ki je najbolj osončena regija v Sloveniji. Povprečna letna osončenost znaša 3,94 kWh/m²/dan, kar pomeni 1,44 MWh/m² letno (ARSO). Pri povprečnem 15-odstotnem izkoristku sončnih elektrarn se na kvadratni meter letno proizvede 216 kWh električne energije. Za proizvodnjo

62,5 TWh električne energije iz sončnih virov (upoštevajoč 5,5 TWh iz hidroelektrarn) bi bila potrebna površina približno 290 km². Dejanska potrebna površina bi bila še večja zaradi neidealne namestitve modulov. Instalirana konična moč PV sistemov pri specifični moči 150 W/m² bi znašala 43,4 GW, kar je približno 53 % trenutne instalirane moči PV sistemov v Nemčiji (81,8 GW). Cena opuščanja fosilnih in jedrskih goriv z obstoječimi OVE tehnologijami je visoka. Pri močnem zvišanju cene energije bi se ustavila gospodarska rast, posledica pa bi bilo pomanjkanje sredstev za nadaljnje investicije v OVE.

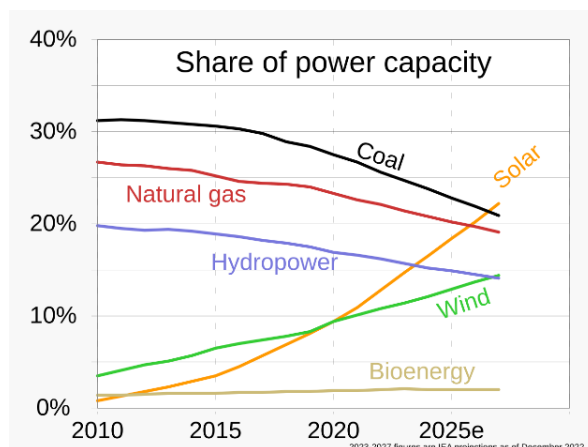
Ena od možnih rešitev za shranjevanje presežkov električne energije bi bila gradnja črpalno-akumulacijskih hidroelektrarn (ČHE). Glede na sezonsko nihanje proizvodnje bi bilo potrebno uskladiščiti vsaj 10,2 TWh električne energije. Zaradi velikih potreb po vodi bi bila edina mogoča rešitev uporaba morja in dvig morske vode na Kraški rob, ki leži 400 metrov nad morjem. Potreben rezervoar bi imel premer 20,8 km in aktivno višino 30 m, kar predstavlja kar 1,7 % površine Slovenije. Instalirana konična moč ČHE črpalk bi znašala 43,4 GW, kar je 31-kratna moč vseh obstoječih slovenskih hidroelektrarn. Napovedi in tehnološke omejitve Prispevek ne poskuša napovedati porabe energije v Sloveniji leta 2050, temveč oceniti izvedljivost popolnega prehoda na OVE. Rezultati kažejo, da bi bile tovrstne rešitve v praksi neizvedljive zaradi tehničnih omejitev, stroškov in odpora javnosti. Zgodovinski podatki kažejo, da se poraba energije dolgoročno povečuje. V poročilu IEA Renewables 2023 se priznava, da sta trenutno edini realni OVE tehnologiji sončna in vetrna energija, pri drugih pa smo že dosegli zgornje meje rasti. Kljub trikratnemu povečanju kapacitet PV in vetrnih elektrarn do leta 2030 to ne bo zadoščalo niti za pokritje rasti porabe energije, kaj šele za nadomeščanje fosilnih virov. Možnosti za tehnološki napredek obstajajo, vendar smo že blizu termodinamičnih omejitev. Pričakovanje, da bodo obstoječe tehnologije rešile problem, je nerealno. Raziskave kažejo tudi, da bo prehod na vodik kot energent dodatno povečal porabo električne energije, s čimer bi postale energetske potrebe še večje. Skladiščenje energije ostaja velik izziv. Ocene stroškov za ČHE sisteme znašajo 47 EUR/kWh, za Li-ion baterijske sisteme pa 346 EUR/kWh. Za Slovenijo bi to pomenilo strošek 268.000 EUR na prebivalca za ČHE sistem in skoraj 2 milijona EUR za baterijski sistem, kar je ekonomsko nevzdržno.

Analize kažejo, da bi nadomeščanje fosilnih in jedrskih goriv izključno z obstoječimi OVE tehnologijami do leta 2050 zahtevalo megalomanske in ekonomsko neizvedljive projekte. Politika in zeleni aktivisti lahko določen čas ignorirajo fizikalne zakone, vendar bo realnost postavila meje. V prihodnosti bo treba razmisliti o bolj uravnoteženih rešitvah, ki bodo združevale OVE, nove tehnologije in prilagoditve v načinu rabe energije. Potrebna bo tudi sprememba vrednot in ekonomskih sistemov, ki trenutno temeljijo na nenehni rasti in povečevanju produktivnosti. Trajnostne rešitve bodo zahtevale premik k racionalni rabi energije in tehnološkim inovacijam, ki bodo presegle trenutne omejitve OVE.

Viri: [9][12][13][14][16][19][21]

Delež OVE po svetu

Graf Mednarodne agencije za energijo na sliki 10 prikazuje spremembo v strukturi kumulativne svetovne proizvodne zmogljivosti električne energije po posameznih tehnologijah med leti 2010 in 2025. Gre za podatke o skupni instalirani moči, torej o zmogljivosti vseh nameščenih energetskih sistemov, ne glede na njihovo trenutno obratovanje ali dejansko letno proizvodnjo elektrike. Zajemajo se glavni viri: sončna fotovoltaika (Solar), vetrna energija (Wind), hidroenergija (Hydropower), biomasa (Bioenergy), ter fosilni viri, kot so premog (Coal) in zemeljski plin in nafta (Natural gas).



Slika 10: Svetovna proizvodnja električne energije v deležih posameznih virov.

(vir: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-cumulative-power-capacity-by-technology-2010-2027>)

Leta 2010 je več kot polovica svetovne zmogljivosti električne energije temeljila na fosilnih gorivih, pri čemer je imel premog daleč največji delež, sledila sta zemeljski plin in nafta. V istem obdobju so obnovljivi viri energije predstavljali približno četrtino zmogljivosti, pri čemer je prevladovala hidroenergija. Vetrna in sončna energija sta imeli v tistem trenutku še razmeroma majhen delež, kljub temu pa je bila njihova rast že takrat opazna. V obdobju 2010–2022 se je struktura proizvodnih zmogljivosti bistveno spremenila. Najizrazitejši porast je opazen pri sončni fotovoltaiki, ki se je iz skoraj zanemarljivega deleža v letu 2010 razvila v enega ključnih nosilcev rasti zmogljivosti. Prav tako se je močno povečal delež vetrne energije. Skupaj z biomaso in novo instalirano hidroenergijo so obnovljivi viri postali dominantni v novih naložbah. Posledično je absolutna zmogljivost proizvodnje elektrike iz obnovljivih virov močno preseгла rast konvencionalnih virov, zlasti po letu 2015, ko so se stroški sončne in vetrne energije bistveno znižali zaradi tehnološkega napredka, ekonomije obsega in političnih spodbud v številnih državah. Fosilni viri, zlasti premog in nafta, so po letu 2015 pričeli izgubljati relativni delež v svetovni zmogljivosti. Čeprav so bile v določenih regijah, predvsem v državah v razvoju, še vedno izvajane nove investicije v premogovne elektrarne, so bile te več kot uravnotežene z zmanjševanjem obsega v razvitih državah in močno rastjo obnovljivih virov. Jedrska energija v celotnem obdobju ostaja razmeroma stabilna z majhnim neto povečanjem kapacitet, predvsem zaradi dolgih časovnih okvirov načrtovanja in gradnje ter visokih začetnih investicijskih stroškov. Napovedi do leta 2027, kot jih prikazuje isti vir, kažejo na nadaljevanje trenda rasti obnovljivih virov. Predvsem sončna energija naj bi še naprej predstavljala največji delež novih instalacij, s čimer naj bi do leta 2027 postala tudi največji posamezni vir po skupni zmogljivosti. Vetrna energija prav tako ostaja pomembna, z dodatno rastjo tako na kopnem kot na morju. Delež fosilnih goriv naj bi se v kumulativni zmogljivosti še naprej zmanjševal, pri čemer bo premog verjetno doživel največji relativni upad. Hkrati se predvideva, da bo hidroenergija ohranila stabilen, a postopoma zmanjšujoč delež zaradi geografskih omejitev in okoljske problematike novih projektov. Trend, ki ga ta graf jasno odraža, potrjuje globalni energetske prehod: pospešeno zmanjševanje odvisnosti od fosilnih goriv ter povečevanje deleža obnovljivih in trajnostnih virov energije. Ta proces poganjajo kombinacija ekonomskih dejavnikov, političnih odločitev, tehnološkega napredka in okoljske nujnosti. Hkrati pa nakazuje, da bodo prihodnje energetske strategije vse bolj temeljile na decentraliziranih in nizkoogljičnih tehnologijah, z izrazitim poudarkom na sončni in vetrni energiji kot temeljnih stebrih elektroenergetskega sistema 21. stoletja.

V nadaljevanju bom opisala vrste OVE s tehničnega vidika in predstavila nekaj primerov po svetu in v Sloveniji.

Viri: [12][22][33][34][36][40]

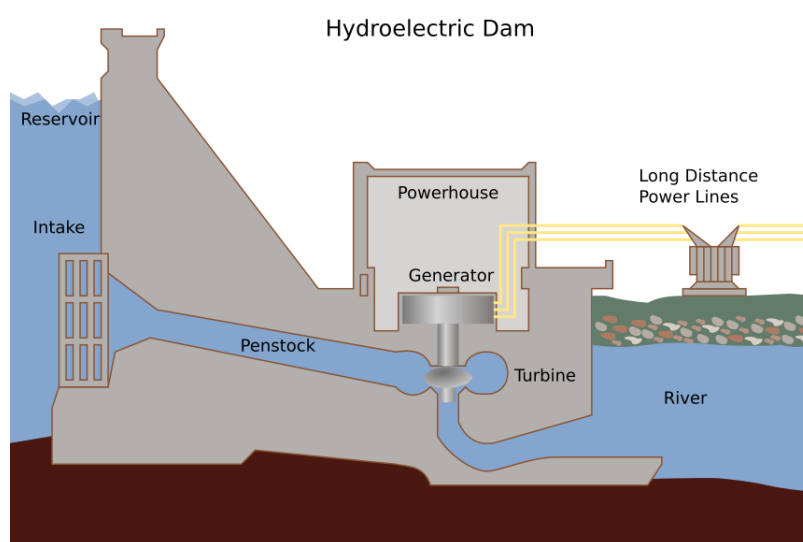
VODNA ali HIDROENERGIJA

Vodna energija ali hidroenergija (tudi moč vode) je uporaba padajoče ali hitro tekoče vode za proizvodnjo električne energije v hidroelektrarnah (v nadaljevanju HE) ali pogon strojev. To se doseže s pretvorbo gravitacijskega potenciala ali kinetične energije vodnega vira za proizvodnjo energije. Hidroenergija se danes uporablja predvsem za proizvodnjo hidroelektrične energije in se uporablja tudi kot polovica sistema za shranjevanje energije, znanega kot črpalna hidroelektrarna (v nadaljevanju ČHE). Voda je eden izmed najstarejših virov energije, ki se jih je človek naučil izkoriščati. Je najpomembnejši obnovljiv vir energije. Kar 21,6 % vse električne energije na svetu je proizvedeno z izkoriščanjem energije vode oz. hidroenergije. Hidroenergijo so začeli izkoriščati naši predniki že pred dvema tisočletjema za direkten pogon mlinov, žag, črpalk in drugih podobnih naprav. Kasneje v 19. stoletju, so ljudje ugotovili, da lahko hidroenergijo pretvorijo v električno energijo. Ljudje so izkoriščanje hidroenergije v energetske namene skozi vso zgodovino le izpopolnjevali in večali njen obseg. Rezultat tega razvoja so velike hidrocentrale, ki imajo moči od nekaj 100 do nekaj 1000 MW. Danes se hidroenergija koristi predvsem za proizvodnjo električne energije. Izkoriščanje vodne energije je odvisno od mnogih geografskih in klimatskih pogojev. Nekatere države tako na ta način proizvedejo pretežni delež celotne električne energije.

Hidroenergija je privlačna alternativa fosilnim gorivom, saj neposredno ne proizvaja ogljikovega dioksida ali drugih onesnaževal ozračja in zagotavlja relativno stalen vir energije. Kljub temu ima ekonomske, sociološke in okoljske slabosti ter zahteva dovolj energičen vir vode, kot je reka ali dvignjeno jezero. Mednarodne institucije, kot je Svetovna banka, vidijo hidroenergijo kot nizkoogljeno sredstvo za gospodarski razvoj. Ugotovljene so bile nekatere slabosti hidroenergije, oz. izgradnje hidroelektrarn. Poškodbe jezov imajo lahko katastrofalne posledice, vključno z izgubo življenj, premoženja in onesnaženjem zemljišč. Jezovi in akumulacijski rezervoarji imajo lahko velike negativne vplive na rečne ekosisteme, kot so preprečevanje gibanja nekaterih živali gorvodno, hlajenje in deoksigenacija vode, ki se izpušča dolvodno, ter izguba hranil zaradi usedanja delcev. Rečni sedimenti gradijo rečne delte, jezovi pa jim preprečujejo, da bi obnovili izgubljeno zaradi erozije. Poleg tega so študije pokazale, da lahko gradnja jezov in akumulacijskih rezervoarjev povzroči izgubo habitata za nekatere vodne vrste. Velike in globoke jezove in akumulacijske elektrarne pokrivajo velika območja kopnega, kar povzroča emisije toplogrednih plinov zaradi podvodnega gnijočega rastlinja. Poleg tega je bilo ugotovljeno, da hidroelektrarne, čeprav na nižjih ravneh kot drugi obnovljivi viri energije, proizvedejo metan, ki ustreza skoraj milijardo ton toplogrednega plina CO₂ na leto. Do tega pride, ko se organske snovi kopičijo na dnu rezervoarja zaradi deoksigenacije vode, ki sproži anaerobno razgradnjo. Ljudje, ki živijo v bližini lokacije hidroelektrarne, so med gradnjo ali ko bregovi akumulacijskih jezer postanejo nestabilni, razseljeni.

Hidroelektrarna je največja uporaba hidroenergije. Hidroelektrarna proizvede približno 15% svetovne električne energije in zagotavlja vsaj 50% celotne oskrbe z električno energijo za več kot 35 držav. Leta 2021 je svetovna nameščena hidroelektrarna dosegla skoraj 1400 GW, kar je največ med vsemi tehnologijami obnovljivih virov energije. Proizvodnja hidroelektrične energije se začne s pretvorbo potencialne energije vode, ki je prisotna zaradi nadmorske višine lokacije, ali kinetične energije premikajoče se vode v električno energijo. Hidroelektrarne se razlikujejo po načinu pridobivanja energije. Ena vrsta vključuje jez in rezervoar. Voda v rezervoarju je na voljo po potrebi za proizvodnjo električne energije, tako da teče skozi kanale, ki povezujejo jez z rezervoarjem. Voda vrti turbino, ki je povezana z generatorjem, ki proizvaja električno energijo. Druga vrsta se imenuje pretočna elektrarna. V tem primeru se zgradi jez za nadzor pretoka vode, brez rezervoarja. Pretočna rečna elektrarna potrebuje neprekinjen pretok vode in ima zato manjšo sposobnost zagotavljanja energije po potrebi. Kinetična energija tekoče vode je glavni vir energije. Obe zasnovi imata omejitve. Na primer, gradnja jezu lahko povzroči nelagodje bližnjim prebivalcem. Jez in akumulacijski rezervoarji

zavzemajo relativno veliko prostora, čemur lahko nasprotujejo bližnje skupnosti. Poleg tega imajo lahko akumulacijski rezervoarji velike okoljske posledice, kot je škoda za habitate v spodnjem toku. Po drugi strani pa je omejitev projekta pretočne reke zmanjšana učinkovitost proizvodnje električne energije, ker je proces odvisen od hitrosti sezonskega rečnega toka. To pomeni, da deževno obdobje poveča proizvodnjo električne energije v primerjavi s sušnim obdobjem. Velikost hidroelektrarn se lahko razlikuje od majhnih elektrarn, imenovanih mikro hidroelektrarne, do velikih elektrarn, ki oskrbujejo z energijo celotno državo. Od leta 2019 je pet največjih elektrarn na svetu konvencionalnih hidroelektrarn z jezovi. Hidroelektrarna se lahko uporablja tudi za shranjevanje energije v obliki potencialne energije med dvema rezervoarjema na različnih višinah s črpalno elektrarno. Voda se v obdobjih nizkega povpraševanja črpa navkreber v rezervoarje, da se sprosti za proizvodnjo, ko je povpraševanje veliko ali je proizvodnja sistema nizka. Druge oblike proizvodnje električne energije s hidroenergijo vključujejo generatorje plimovanja, ki za proizvodnjo električne energije uporabljajo energijo plimovanja, ustvarjeno iz oceanov, rek in umetnih kanalskih sistemov.



Slika 11: Prerez simbolične hidroelektrarne.

[vir: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/Hydroelectric_dam.svg]

Na prikazani shemi je prikazana tipična akumulacijska hidroelektrarna z jezo, ki deluje na principu pretvorbe potencialne energije zadržane vode v mehansko in nato električno energijo. Na levi strani slike je vidno akumulacijsko jezero (reservoir), kjer se zbira voda, zadržana za jezo. Voda v jezeru ima zaradi višinske razlike glede na nižjo iztokovno točko veliko potencialno energijo. Preko vtočnega kanala (intake), ki je opremljen z zaščitnimi rešetkami za preprečevanje vdora večjih delcev in plavja, voda vstopi v tlačni cevovod. Tlačni cevovod (penstock) vodi vodo proti turbinski dvorani. Voda teče skozi cev pod vplivom gravitacije in zaradi višinske razlike pospeši, kar ji poveča kinetično energijo. Na koncu tlačnega cevovoda se voda usmeri na turbino, najpogosteje Francisovo ali Peltonovo v primeru večjih višinskih razlik, ki se prične vrteti pod vplivom toka. Turbina je mehansko povezana z generatorjem, ki se nahaja v strojnici (powerhouse). Rotacijsko gibanje turbine povzroči vrtenje rotorja generatorja, kar po principih elektromagnetne indukcije generira električno napetost. Ta se preko transformatorjev in daljnovodov posreduje v elektroenergetski sistem. Po prehodu skozi turbino se voda odvaja nazaj v rečno strugo (river), s čimer se zaključi cikel. Pomembno je poudariti, da gre za zaprti pretok skozi sistem, pri čemer ne prihaja do porabe vode, kar predstavlja pomembno okoljsko prednost. Ta tip hidroelektrarne omogoča zelo hiter odziv na potrebe elektroenergetskega omrežja, saj lahko skoraj takoj poveča ali zmanjša proizvodnjo električne energije. Poleg osnovne funkcije proizvodnje elektrike pa objekti tega tipa pogosto omogočajo tudi poplavno zaščito,

namakanje, oskrbo s pitno vodo ter rekreacijske in turistične dejavnosti. Z vidika načrtovanja in gradnje so ključni elementi pravilna izbira lokacije, analiza hidrologije ter geomehanskih lastnosti terena, saj so gradbena dela (jez, galerije, tlačni cevovodi) in elektrostrojna oprema (turbine, generatorji, transformatorji) glavni stroškovni komponenti tovrstnih objektov. Optimalna izvedba omogoča dolgo življenjsko dobo elektrarne (tudi več kot 50 let), visoko razpoložljivost in nizke obratovalne stroške.

Kako smo s HE v Evropi? V začetku 20. stoletja sta razvoj hidroenergije v Evropi spodbudila dva glavna dejavnika: v severni Evropi, zlasti na Norveškem in Švedskem, so visoke padavine in gorski relief omogočili izdaten vodni potencial, medtem ko je na jugu pomanjkanje premoga države usmerilo v iskanje alternativnih virov energije. Švica je zgodaj začela izkoriščati alpske reke in Ren, Italija pa se je v porečju Pada preusmerila iz mehanske na električno rabo vode. Do leta 1898 so začele prve velike hidroelektrarne nadomeščati več tisoč vodnih mlinov, energija pa se je začela usmerjati iz gorskih območij v urbana središča. Italija je hitro elektrificirala državo skoraj izključno s hidroenergijo, a do prve svetovne vojne še ni imela enotnega sistema za upravljanje vodnih pravic. Nemška hidroenergija je izhajala iz tradicije manjših jezov, ki so v 15. stoletju poganjali rudnike in mline. Do 19. stoletja so se nekateri industrijski obrati še vedno zanašali na vodna kolesa. Gradnja večjih jezov (Urft, Möhne, Eder) je bila prvotno usmerjena v preprečevanje poplav in izboljšanje plovnosti, hidroenergija pa se je izkazala za dodaten vir. Po prvi svetovni vojni je Bavarska z elektrarno na Walchenseeu dosegla državno elektroenergetsko omrežje, saj je po vojni izgubila dostop do premoga. Po drugi svetovni vojni je gradnja jezov močno pospešila proizvodnjo hidroenergije, a jo je spremljal odpor: kmetijski interesi so bili oškodovani zaradi sprememb v namakanju, številni mali mlini so izgubili pretok, medtem ko so se v javnosti pojavili konflikti glede lokacije jezov, koristi in razlastitev. Hidroenergija je postala tudi simbol regionalne identitete in političnega nasprotovanja premogovni eliti na severu.

V Sloveniji imajo hidroelektrarne pomembno vlogo v elektroenergetskem sistemu, saj proizvedejo približno 30–35 % vse električne energije, v posameznih hidrološko ugodnih letih tudi več. Glavni vodotoki, na katerih so zgrajene hidroelektrarne, so Drava, Sava in Soča, pri čemer ima največji delež Drava. Dravske elektrarne predstavljajo največji hidroenergetski sistem v Sloveniji, z 8 elektrarnami med Dravogradom in Forminom. Skupna inštalirana moč znaša 575 MW, letna proizvodnja pa 2646 GWh, kar pomeni okoli 70 % vse slovenske hidroprodukcije. Največjo proizvodnjo imajo HE Zlatoličje (577 GWh) in HE Formin (548 GWh), sledijo jim HE Ožbalt, Vuhred in Mariborski otok. Savin sistem obsega 6 elektrarn med Mostami in Blanco s skupno močjo 188 MW in letno proizvodnjo 599 GWh, kar je približno 16–18 % vse hidroprodukcije v Sloveniji. Največ prispevata HE Blanca (144 GWh) in HE Vrhovo (116 GWh). Slovenija ima razvit hidroenergetski sistem, ki je zanesljiv, obnovljiv in domač vir električne energije. Drava je daleč najpomembnejša hidroenergetska os, Sava pa pomembna dopolnitev. Skupna letna proizvodnja hidroelektrarn v Sloveniji presega 3200 GWh, kar zadostuje za pokritje tretjine potreb po električni energiji. Potencial za dodatni razvoj hidroenergije obstaja predvsem na srednji in spodnji Savi.

Črpalna hidroelektrarna Avče na reki Soči ima ključno vlogo pri regulaciji elektroenergetskega sistema Slovenije. Njena osnovna funkcija je shranjevanje presežne električne energije v obliki potencialne energije vode, ki jo z dvigovanjem v zgornji rezervoar (v umetno zgornjo akumulacijo na Kanalskem vrhu) črpa v času nizkega povpraševanja po električni energiji. Ko povpraševanje naraste, se voda spusti nazaj skozi turbine, s čimer se proizvede električna energija. Je prva in zaenkrat edina ČHE v Sloveniji. Moč proizvodnje električne energije znaša 185 MW, moč porabe pa 180 MW, kadar črpa vodo iz akumulacije Ajba navzgor. Spodnja akumulacija je jezero za HE Plave, zgornja akumulacija, ki lahko shrani 2,2 milijona kubičnih metrov vode, pa je umetno jezero na Banjški planoti. Višinska razlika med akumulacijama oz. bruto padec je 521 metrov. Skupna shranjena potencialna energija v ČHE Avče je približno 3 GWh. Izkoristek ČHE Avče je po podatkih Soških elektrarn v letnem povprečju 77%, kar pomeni, da se obratovanje izplača, če je proizvedena električna energija vsaj 30% dražja kot je energija med črpanjem, npr. ob obilici sončne energije, ponoči in med prazniki. Prostornina zgornje

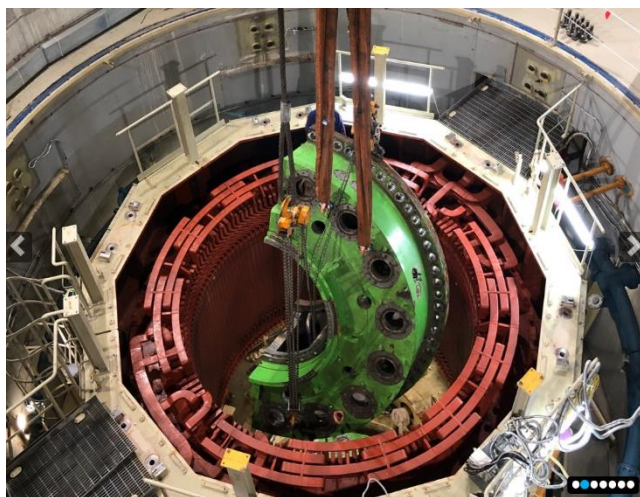
akumulacije dovoljuje proizvodnjo s polno močjo do največ 15 ur, če povsem izpraznimo poln bazen - ponovno polnjenje praznega bazena zahteva okoli 17 ur. Dnevni režim delovanja je že glede na cenovna razmerja tak, da bo v vsakem načinu ČHE delovala 6 do največ 10 ur; torej je možno izkoristiti tudi večdnevno ali tedensko optimiranje delovanja, s polnjenjem ob koncu tedna in postopnim praznjenjem tekom tedna.



Slika 12: Zgornje akumulacijsko jezero za ČHE Avče (kopanje ali kakršnokoli zadrževanje na jezeru ni dovoljeno).

[vir: <https://primorske.svet24.si/primorska/goriska/da-za-soncno-elektrarno-na-kanalskem-vrhu>]

Poleg ČHE Avče so na reki Soči prisotne manjše hidroelektrarne, ki izkoriščajo njeno strmo strugo za lokalno proizvodnjo električne energije. Na ostalih slovenskih rekah, kot recimo na reki Kolpi, pa delujejo predvsem manjše klasične hidroelektrarne, prilagojene nižji vodnatosti, ki zagotavljajo energetska oskrbo lokalnih območij, a ne predstavljajo večjih sistemskih enot. Ti objekti prispevajo k razpršenemu in trajnostnemu izkoriščanju vodnega potenciala manjših slovenskih rek.



Slika 13: Generalni remont turbine in generatorja v črpalni hidroelektrarni Avče (ČHE) v Sloveniji. Ta remont je vključeval popolno demontažo generatorja, vključno z izvlečenjem 280-tonskega rotorja. Posebej zahtevna faza je bila dvig polovice pokrova turbine, ki je tehtal 24 ton, skozi stator generatorja z razmikom manj kot 100 mm. Remont je bil izveden l. 2019.

[vir: <https://www.rudis.si/en/news/remont-che-avce/>]

Največja slovenska hidroelektrarna po inštalirani moči in letni proizvodnji je HE Zlatoličje, ki deluje na reki Dravi in je bila zgrajena leta 1969. Ima nazivno moč 114 MW in v povprečju letno proizvede približno 577 GWh električne energije. Gre za t. i. pretočno-akumulacijsko elektrarno z nižjim padcem, ki izkorišča stalen pretok reke in deluje kot del verige dravskih elektrarn, kar omogoča zanesljivo in stabilno proizvodnjo.



Slika 14 in 15: HE Zlatoličje, na desni sliki je prerez sheme HE.

[vir: <https://www.dem.si/sl/elektrarne-in-proizvodnja/elektrarne/?id=2019090508585647>]

Reka Mura ima še vedno neizkoriščen hidroenergetski potencial, vendar tam ni zgrajenih velikih hidroelektrarn zaradi okoljskih, naravovarstvenih in družbenih razlogov. Mura je eden redkih večjih rečnih sistemov v Sloveniji z ohranjeno dinamično strugo, mrtvicami, poplavnimi gozdovi in mokrišči. Celotno območje je del omrežja Natura 2000, kar pomeni, da je zavarovano zaradi izjemne biotske raznovrstnosti. Načrti za HE na Muri (zlasti HE Hrastje-Mota) so že več desetletij sprožali močan odpor lokalnih skupnosti, okoljevarstvenih organizacij in širše javnosti. Leta 2020 je vlada pod pritiskom civilne družbe končno prenehala s postopki za gradnjo hidroelektrarn na Muri. Mura ima majhen padec (nizek gradient), kar pomeni, da bi bile hidroelektrarne zgrajene kot nizkotlačne pretočne elektrarne, ki pa imajo velik vpliv na rečno dinamiko in slabši energetski izkoristek. Težko je torej najti sprejemljivo razmerje med energetskim dobičkom in vplivi na okolje. Zanimivo pa je, da imajo sosedje Avstrijci vendarle hidroelektrarne na reki Muri, in sicer zato, ker so jih začeli graditi že v 70. letih prejšnjega stoletja, v obdobju, ko okoljska zakonodaja in zavest o varovanju narave še nista bili tako razviti kot danes. Mura na avstrijskem Štajerskem je bila v preteklosti močno regulirana, kar je omogočilo gradnjo nizkotlačnih pretočnih hidroelektrarn, kot so Gössendorf, Kalsdorf, Gratkorn in druge. Avstrijska energetska politika je hidroenergijo že zgodaj prepoznala kot ključni vir električne energije, zato so sistematično razvijali energetsko izrabo svojih rek, tudi na račun degradacije naravnih ekosistemov.

Z vidika trajnostnega razvoja in celostnega upravljanja z vodami se postavlja vprašanje, ali je energetski izkoristek posamezne hidroelektrarne res zadosten razlog za nepovratno degradacijo naravnega rečnega ekosistema. Ob razpoložljivosti drugih obnovljivih virov energije, ter vedno bolj učinkovitih tehnologijah za shranjevanje električne energije, postaja upravičenost posegov v še ohranjene vodne sisteme vse bolj vprašljiva. V prizadevanjih za energetsko neodvisnost in nizkoogljično družbo bi morali kot družba resno premisliti, ali je dodatna kilovatna ura res vredna izgube naravne reke, ki s svojimi ekosistemskimi storitvami pogosto dolgoročno presega energetske koristi takšnih posegov. Pri tem velja poudariti, da Slovenija na tem področju kaže razmeroma uravnotežen pristop. Skozi zadnja desetletja je uspela razviti obsežen hidroenergetski sistem, predvsem na rekah Drava in Sava, hkrati pa ohraniti najdragocenejše dele vodnih ekosistemov, kot je reka Mura. Sprejeta odločitev o opustitvi načrtovane gradnje hidroelektrarn na Muri in vključitev njenega porečja v območje Natura 2000 ter UNESCO biosferno območje odraža visoko stopnjo okoljske odgovornosti. Mnogo vprašljivejši so pristopi nekaterih sosednjih držav, kjer izraba vodnih virov še vedno poteka na račun okoljske degradacije, pogosto pod pretvezo energetske nujnosti. Slovenija tako na področju hidroenergije že dosega dober kompromis med energetsko učinkovitostjo in varstvom narave, kar bi lahko služilo kot primer dobre prakse tudi širše v regiji.

Največja HE na svetu je Hidroelektrarna Treh sotesk (Three Gorges Dam) na reki Jangce na Kitajskem. Njena nazivna moč znaša približno 22.5 GW, kar jo uvršča na vrh med hidroenergetskimi objekti globalno. Gradnja te elektrarne se je začela leta 1994, obratovanje pa je bilo postopno vzpostavljeno med leti 2003 in 2012. HE Treh sotesk dosega visoko energetske učinkovitost, z izkoristkom pretvorbe potencialne energije vode v električno energijo med 90-95% in s tem zadovoljuje energetske potrebe več deset milijonov ljudi, saj oskrbuje regije z več kot 30 milijoni prebivalcev. Poleg proizvodnje električne energije je HE Treh sotesk ključna za uravnavanje vodostajev, preprečevanje poplav in izboljšanje plovnosti reke Jangce, kar ima velik družbeno-ekonomski pomen za Kitajsko. Gradnja hidroelektrarne Treh sotesk na reki Jangce je bila ena največjih in hkrati najbolj spornih infrastrukturnih investicij v zgodovini Kitajske. Projekt, katerega stroški so se ocenili na več deset milijard ameriških dolarjev (približno 30 do 40 milijard USD), je povzročil obsežne družbene in okoljske spremembe. Za izvedbo gradnje je kitajska vlada morala preseliti več kot milijon ljudi, ki so prebivali na območjih, namenjenih zaježitvi in nastanku velikanskega akumulacijskega jezera. Ti ljudje so bili prisilno odseljeni iz svojih domov, kar je sprožilo številne družbene težave, vključno z izgubo tradicionalnih življenjskih prostorov, družinskih vezi in gospodarskih virov. Zaradi zaježitve reke Jangce je nastalo ogromno jezero, ki je poplavilo približno 632 km² površin, vključno s kmetijskimi zemljišči, zgodovinskimi kraji in celo nekaterimi kulturnimi spomeniki. Poleg tega je gradnja povzročila motnje v lokalnih ekosistemi, spremembe v sedimentaciji reke in negativne vplive na biotsko raznovrstnost. Kritiki projekta so opozarjali tudi na povečano nevarnost zemeljskih plazov in degradacijo okolja zaradi premestitve tal in izgradnje velikih infrastrukturnih objektov. Kljub temu je projekt podpirala kitajska vlada z argumenti o pomembnosti hidroelektrarne za energetske neodvisnost, zmanjševanje izpustov toplogrednih plinov in uravnavanje poplav, ki so bile v preteklosti pogoste in uničujoče v dolini reke Jangce. Gradnja HE Treh sotesk je povzročila intenzivno javno razpravo tako na domači kot mednarodni ravni, saj je bil projekt zaznamovan z velikimi kompromisi med gospodarskim razvojem, družbenimi posledicami in okoljskimi vplivi.



Slika 16: Hidroelektrarna Treh sotesk na kitajski reki Jangce.

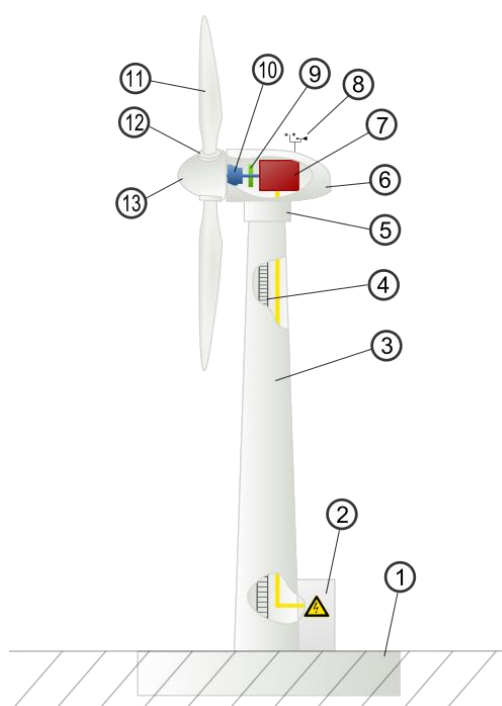
[vir: <https://cdn.britannica.com/20/119620-050-AC901996/Yichang-Three-Gorges-Dam-Yangtze-River-China.jpg>]

Viri: [5][18][20][22][39][50][51][52]

VETERNA ENERGIJA

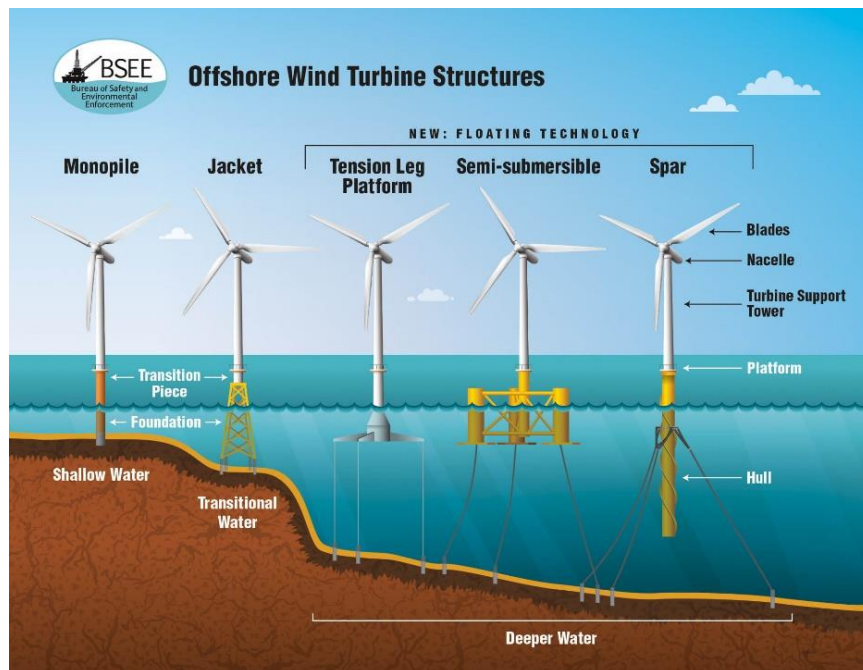
Veterna energija predstavlja eno izmed ključnih oblik izrabe obnovljivih virov, saj omogoča proizvodnjo električne energije brez neposrednih emisij toplogrednih plinov in brez porabe goriva. V preteklosti se je veter izkoriščal za pogon jader, mlinov in črpalk za vodo, danes pa skoraj izključno za proizvodnjo električne energije z uporabo vetrnih turbin. Te so v veliki večini razporejene v večje skupine, imenovane vetrne farme, ki so priključene na električno omrežje. Globalno je bilo leta 2024 proizvedenih več kot 2.494 TWh električne energije iz vetra, kar predstavlja približno 8,1 % svetovne proizvodnje elektrike. To pomeni skoraj trikratno rast v primerjavi z letom 2015, trend pa se mora po mnenju mnogih analitikov še dodatno pospešiti, če želimo doseči cilje Pariškega podnebneega sporazuma in omejiti globalno segrevanje.

Veternica deluje tako, da pretvarja kinetično energijo vetra v električno energijo s pomočjo več komponent. Veter najprej zadene lopatice rotorja – ponavadi so te tri (11), ki so pritrjene na rotor oz. pesto (13). Število, dolžina in naklon lopatic vplivajo na količino zajete energije. S pomočjo sistema za nastavitvev naklona lopatic (12) se lopatice dinamično prilagajajo vetrovnim razmeram, da se optimizira delovanje in prepreči poškodbe pri premočnem vetru. Rotacija rotorja se preko menjalnika (10) prenese na generator (7), ki mehansko energijo pretvori v električno. Če ima turbina neposredni pogon, menjalnika morda ni, vendar je večina vetrnic še vedno opremljena z njim. Zavorni sistem (9), bodisi električni ali mehanski, skrbi za ustavljanje rotorja v primeru premočnih vetrov ali vzdrževanja. Vse te komponente so nameščene v ohišju na vrhu stolpa (6), ki ščiti mehanske in električne dele. Smer kamor se bo obrnila vetrnica se spremlja z anemometrom (8), ki meri hitrost in smer vetra. Na podlagi teh podatkov sistem za orientacijo vetrnice (5) obrača ohišje v pravo smer, tako da lopatice vedno optimalno zajamejo veter. Celotna struktura je postavljena na stolp (3), ki omogoča višji položaj rotorja, kjer so vetrovi močnejši in bolj konstantni. V notranjosti stolpa se nahaja lestev (4) za dostop do ohišja za servisiranje. Proizvedena električna energija se preko povezave z električnim omrežjem (2) prenese v distribucijski sistem. Vetrnico trdno drži na mestu temelj (1), ki prenaša vse obremenitve (veter, teža, vibracije) na tla. Te se razlikujejo glede na to, ali je vetrnica postavljena na kopnem (onshore) ali na vodi (offshore). Pri kopenskih vetrnicah so temelji običajno masivni betonski bloki, vgrajeni neposredno v zemljo, kjer so pogoji bolj stabilni. Pri morskih vetrnicah pa so konstrukcije veliko bolj zahtevne – lahko so to fiksne podvodne strukture, ki so pritrjene na morsko dno (pri plitvih vodah), ali pa plavajoče platforme, ki so zasidrane in omogočajo postavitve turbin tudi na globokih morjih. Poleg temeljev se razlikuje tudi način priklopa na električno omrežje (2), saj je treba pri offshore vetrnicah elektriko prek podvodnih kablov prenesti na obalo, kar poveča kompleksnost in stroške projekta.



Slika 17: Zgradba vetrnice.

(vir: <https://kliimaministeerium.ee/sites/default/files/documents/2025-03/Tuuleparkide%20keskkonnam%C3%B5ju%20hindamise%20juhend.pdf>)



Slika 18: Konstrukcije za vetrne elektrarne na morju.

(vir: <https://www.windpowerengineering.com/ready-to-float-a-permanent-cost-reduction-for-offshore-wind/>)

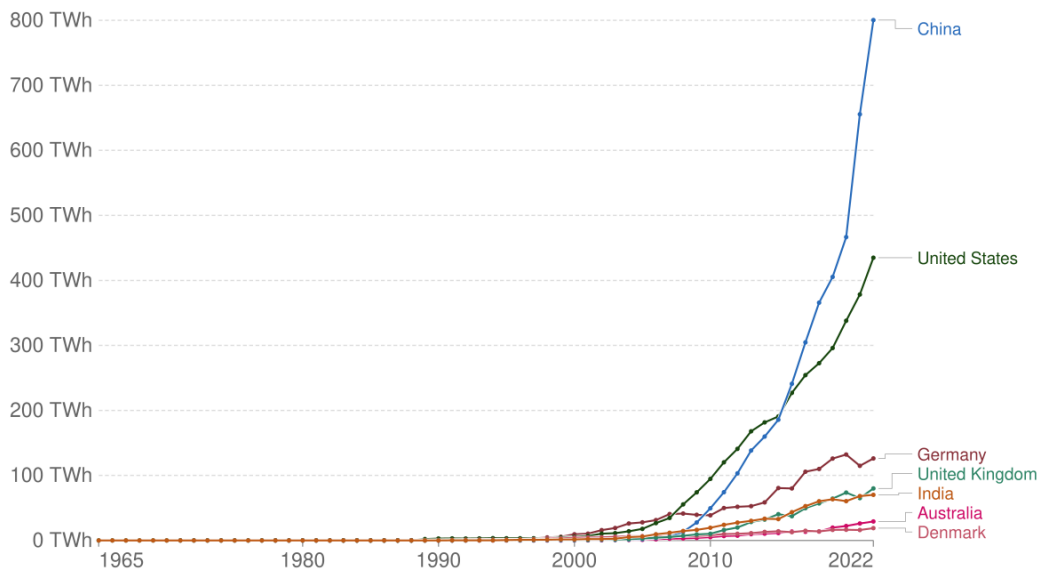
Slika 17 prikazuje različne strukture za postavitev morskih (offshore) vetrnic, ki se uporabljajo glede na globino vode in tehnološke možnosti. Na levi strani so prikazani temelji za plitvine, na desni pa sodobne plavajoče rešitve za globoke vode. Od leve proti desni si sledijo:

1. Monopile (enostebrni temelj) – uporablja se v plitvi vodi, običajno do 30 metrov globine. Gre za velik jekleni steber, ki je zabit neposredno v morsko dno. Na njem stoji prehodni kos (transition piece), ki povezuje temelj s stolpom vetrnice.
2. Jacket (rešetkasta struktura) – uporablja se v prehodni globini (30–60 metrov). Gre za jekleno ogrodje s trikotno ali štirikotno osnovo, ki nudi večjo stabilnost in se sidra na dno. Zaradi odprte konstrukcije je primerna za območja z močnejšimi tokovi ali večjo seizmično aktivnostjo.
3. Tension Leg Platform (napeta plavajoča platforma) – ena izmed plavajočih tehnologij, primerna za globoko vodo (nad 60 metrov). Platforma plava na vodi in je s kabli napeta in zasidrana na dno. Ta sistem nudi stabilnost kljub majhni lastni teži.
4. Semi-submersible (polpotopna platforma) – prav tako plavajoča struktura, ki temelji na več plavajočih valjih (pontoni), deloma potopljenih v vodo. Je stabilna zaradi široke osnove in se pritrdi na dno z več vrvmi. Primerna za zelo globoke vode, a zahteva zapleteno namestitev.
5. Spar (plavajoči steber) – dolga navpična valjasta struktura, ki večinoma plava pod vodo (»spodnji balast«), in je zasidrana z več napenjalnimi kabli. Ima visok center mase, kar omogoča veliko stabilnost. Uporablja se v najglobljih vodah (100 m in več).

Na desni strani slike so označeni glavni deli vsake vetrnice: »Blades« - lopatice, »Nacelle« - ohišje z generatorjem, »Turbine Support Tower« - nosilni stolp vetrnice, »Platform in Hull« - nosilna struktura pri plavajočih sistemih. Slika lepo ponazarja, kako se s povečevanjem globine vode spreminja tudi način temeljenja in konstrukcije morskih vetrnic – od enostavnih, fiksnih struktur do kompleksnih plavajočih platform. Namen teh rešitev je omogočiti uporabo vetrne energije tudi na območjih, kjer klasična gradnja ni mogoča.

Wind power generation

Annual electricity generation from wind is measured in terawatt-hours (TWh) per year. This includes both onshore and offshore wind sources.



Source: Ember's Yearly Electricity Data; Ember's European Electricity Review; Energy Institute Statistical Review of World Energy
OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

Slika 19: Proizvedena vetrna energija glede na posamezno državo.

(vir: <https://ourworldindata.org/grapher/wind-generation?tab=chart&yScale=linear&time=2000..2021&country=CHN~USA~DEU~IND~GBR>)

Skupna instalirana moč vetrne energije po svetu je v zadnjem desetletju močno narasla. Do konca leta 2021 je bila presežena meja 800 GW, pri čemer je bilo kar 100 GW dodanih zgolj v enem letu, največ na Kitajskem in v ZDA. Trenutno več kot 30 držav pridobi vsaj desetino svoje električne energije iz vetra. Na večini območij je proizvodnja vetra večja ponoči in pozimi, ko je solarna proizvodnja manjša, zato se kombinacija sončne in vetrne energije pogosto uporablja za uravnoteženje proizvodnje. Delež morskih vetrnih elektrarn je še vedno relativno majhen, vendar narašča. Morske vetrnice so postavljene v morju, kjer so vetrovi pogostejši in močnejši, kar omogoča večjo proizvodnjo električne energije na enoto moči, hkrati pa imajo manjši vizualni vpliv na okolje. Vendar pa so stroški izgradnje in vzdrževanja višji zaradi zahtevnosti gradbenih del na vodi, korozivnega vpliva morske vode in zahtevnejše logistike.

Moč, ki jo veter lahko prenese na turbino, je odvisna od gostote zraka, prečnega preseka rotorja in predvsem od hitrosti vetra. Formula za moč vetra, ki prehaja skozi rotor vetrnice, je definirana kot $P = \frac{1}{2} \rho A v^3$ (kjer je ρ - gostota zraka, A - presek rotorja oz. območje, ki ga pokrijejo lopatice, v – hitrost vetra), kar pomeni, da moč narašča s tretjo potenco hitrosti vetra. Že majhna sprememba hitrosti vetra povzroči zelo veliko razliko v razpoložljivi energiji. Na primer, če se hitrost vetra poveča za faktor 2, se razpoložljiva moč poveča za 8-krat. Prav zaradi tega je izbira lokacije ključnega pomena za ekonomsko upravičenost vetrne elektrarne. Pomembno je razumeti, da energijo vetra ni mogoče izkoristiti v celoti. Teoretična omejitev izkoristka je znana kot Betzova limita, po nemškem fiziku Albertu Betzu, ki je že leta 1919 dokazal, da vetrnica ne more pretvoriti več kot 59,3 % kinetične energije vetra v mehansko energijo. Razlog je v tem, da zrak ne sme popolnoma obstati za turbino – mora še vedno teči naprej, sicer ne bi bilo mogoče dovajati novega vetra k rotorju. V praksi imajo sodobne vetrnice izkoristke med 35 in 50 %, kar je v tehničnem smislu zelo blizu teoretični meji.

Največja vetrna farma na svetu je Gansu Wind Farm na Kitajskem s skoraj 8.000 MW skupne instalirane moči. Sledi ji indijska Muppandal Wind Farm (1.500 MW) in Alta Wind Energy Center v Kaliforniji (1.320 MW). Med morskimi projekti prednjači Hornsea Wind Farm v Združenem kraljestvu s 1.218 MW. Poleg tega se razvijajo tudi plavajoče vetrne elektrarne, kot je projekt WindFloat ob portugalski obali, ki omogočajo namestitve turbin na globokih morjih brez potrebe po fiksnih temeljih. Vse večje vetrnice dosegajo premer rotorjev prek 150 metrov, višine nad 100 metrov in nazivno moč tudi nad 10 MW. Njihova konstrukcija postaja vse bolj napredna, saj novejši modeli uporabljajo lažje materiale, aerodinamične izboljšave in napredne nadzorne sisteme za prilagajanje spreminjajočim se vetrovnim pogojem.



Slika 20: Gansu Wind Farm na Kitajskem.

(vir: <https://www.theguardian.com/environment/2008/jul/25/renewableenergy.alternativeenergy>)

Poleg tehničnih vidikov ima vetrna energija tudi pomembno družbeno in okoljsko razsežnost. Ker ne proizvaja lokalnih emisij, pomembno prispeva k zmanjšanju onesnaženosti zraka in omejevanju podnebnih sprememb. Njena okoljska obremenitev je v življenjskem ciklu bistveno manjša kot pri fosilnih virih. Vendar pa so prisotni nekateri negativni vplivi. Najpogostejše izpostavljeni so vizualni vpliv na pokrajino, hrup (okoli 45 dB na 300 m oddaljenosti), vpliv na lokalno favno (zlasti ptice in netopirji) ter prostorska razpršenost turbin. Zaradi razmeroma nizke gostote moči morajo biti turbine postavljene daleč ena od druge, kar pomeni večjo prostorsko zasedenost. Čeprav je med turbinami še vedno mogoče izvajati kmetijske dejavnosti, lahko dostopne poti, temelji in električna infrastruktura vseeno prispevajo k tako imenovani »energetski urbanizaciji«. Moderni pristopi vključujejo prostorsko načrtovanje, kompenzacijske ukrepe za lokalne skupnosti in tehnične rešitve za zmanjšanje vplivov na živali (npr. zaznavanje ptic z radarji, začasno zaustavljanje turbin).

Ekonomika vetrne energije je postala izjemno konkurenčna. Onshore projekti so danes cenejši od novih premogovnih in plinskih elektrarn v večini regij po svetu. Strošek proizvodnje se meri z enotnim stroškom elektrike (LCOE), ki je za vetrno energijo med 26 in 50 USD/MWh za kopenske projekte in okoli 80 USD/MWh za morske. Ker vetrna energija nima stroškov goriva, je cena dolgoročno stabilna, v nasprotju s fosilnimi viri, ki so podvrženi tržnim nihanjem. Prisotnost vetrne energije v omrežju lahko celo zniža skupne stroške elektrike za končne uporabnike, saj zmanjšuje potrebo po dražjih konicah proizvodnje (npr. plinske turbine).

Obstoječe vetrne elektrarne v Sloveniji so zelo majhne – skupaj okoli 3 MW nazivnega inštalirane moči, kar prispeva zgolj 0,06 % letne proizvodnje elektrike (podatek iz leta 2023). Ena vetrna elektrarna se nahaja pri Dolenji vasi (občina Divača), kjer stoji ena vetrnica z nazivno močjo 2,3 MW, ki v praksi obratovanje opravi z manj kot polovico te moči zaradi šibkega vetra. Na lokaciji Razdrto (občina Postojna) pa stoji druga manjša vetrnica z nazivno močjo približno 0,9–1,0 MW, ki prav tako ne dosega visokih izkoristkov. Prve nove projekte, kot na območju Ilirske Bistrice, še čakajo prostorski in okoljski postopki, vključno z nasprotovanji lokalnih skupnosti in zaščitnih režimov Natura 2000. Po mnenju strokovnjakov v Sloveniji ni ustreznih pogojev za širšo izrabo vetrne energije. Podnebne in geografske značilnosti Slovenije ne omogočajo stalnih, zmerno močnih vetrov (nad 5 m/s), ki so potrebni za zanesljivo in stabilno delovanje vetrnih elektrarn. Za varno in stabilno delovanje vetrne elektrarne je potrebna povprečna hitrost vetra okoli 5 m/s, idealno okoli 15 m/s. V Sloveniji ne dosegamo niti prvega, še manj pa drugega, zato proizvodnja ostaja nezanesljiva. Najpogostejši vetrovi, kot je burja na Krasu in Notranjskem, so sunkoviti in presegajo varnostne meje delovanja turbin, kar pomeni, da se te ob višjih hitrostih vetra pogosto izklopijo. Poleg neugodnih naravnih pogojev je problematična tudi sama umestitev vetrnic v prostor. V večini primerov bi gradnja pomenila posege v naravno okolje, ki niso sorazmerni z omejenimi energetskimi koristmi. Prav tako bi bilo potrebno bistveno izboljšati

transparentnost postopkov financiranja in izgradenj. Osebnostno menim, da bi bilo za Slovenijo bolj smiselno usmeriti pozornost v druge obnovljive vire, kjer imamo izrazito večji potencial – predvsem v hidroenergijo, ki je naravno in tehnično bolj primerna za našo državo. Energetsko strategijo je treba graditi na realnih zmogljivostih okolja, ne na modelih, ki temeljijo na pogojih drugih držav.

Veterna energija predstavlja enega izmed pomembnejših delov prehoda v nizkoogljično energetsko prihodnost. Ob naraščajočih cenah emisijskih kuponov, geopolitičnih nestabilnostih in ciljnih zmanjšanja uvoza fosilnih goriv postaja vedno bolj pomembna kot domač vir, ki prispeva k energetski neodvisnosti in varnosti oskrbe.

Viri: [5][19][22][40][53][54][55]

SONČNA ENERGIJA

Sončna energija izvira iz elektromagnetnega sevanja Sonca, ki vključuje svetlobo in toploto. Ta energija je dostopna v skoraj neomejenih količinah (ob sončnih dnevih) in jo lahko izkoriščamo z različnimi tehnologijami. Med glavnimi načini izkoriščanja sončne energije so fotovoltaični sistemi (v nadaljevanju PV – »Photovoltaic cells«), koncentrirana sončna energija (v nadaljevanju CSP – »Concentrating solar-thermal power«) ter solarni toplotni sistemi. PV sistemi pretvarjajo sončno svetlobo neposredno v električno energijo z uporabo polprevodniških celic, pri čemer sončni žarki sprožijo elektronski tok. Koncentrirana sončna energija deluje na principu usmerjanja sončne svetlobe preko leč ali ogledal na manjšo površino, kjer se energija spremeni v toploto, ki nato poganja turbine za proizvodnjo električne energije. Poleg teh aktivnih tehnologij obstajajo tudi pasivne, ki izkoriščajo naravno orientacijo in zasnovo stavb za učinkovitejšo osvetlitev in ogrevanje.

Sončna energija predstavlja najobsežnejši razpoložljivi naravni vir na Zemlji. Površje planeta prejme približno 122 petavatov^{*1} sončnega sevanja, kar večkratno presega človeške energetske potrebe. Prebivalstvo večinoma živi na območjih, kjer dnevna količina sončne energije znaša med 3,5 in 7,0 kWh/m² ^{*2}. Sončna svetloba se absorbira v atmosfero, kopno in oceane, kar spodbuja vremenske pojave ter omogoča fotosintezo, s katero rastline pretvarjajo sončno energijo v kemično. Ta proces je temelj za nastanek biomase in fosilnih goriv.

^{*1} 122 PW (petavatov) = 122.000.000 GW = 122 · 10¹⁵ W

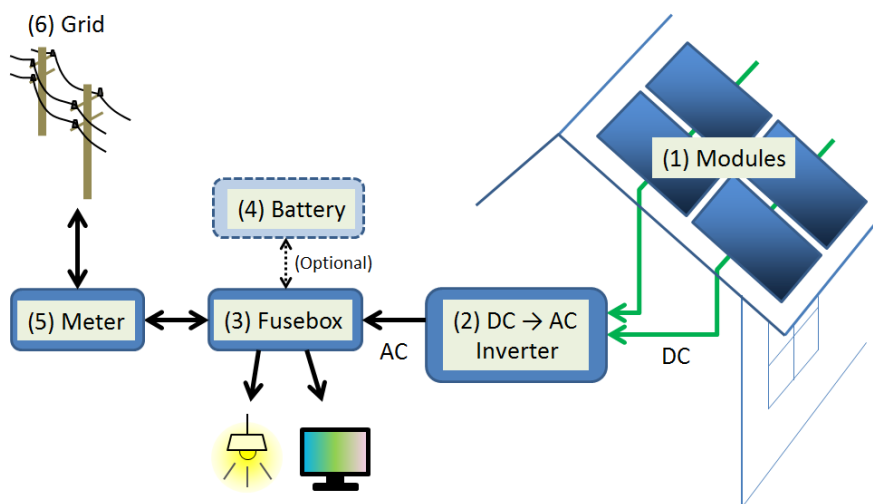
^{*2} V Ljubljani je povprečno okoli 3,6–4,2 kWh/m²/dan, v Primorju je lahko tudi do 4,5–5,0 kWh/m²/dan, v puščavah (npr. Sahara) pa tudi 7 kWh/m²/dan ali več

Realna količina sončne energije, ki jo lahko izkoristi človeštvo, je omejena zaradi geografske lege, vremenskih vplivov ter razpoložljivosti prostora. Kljub temu bi bilo za pokritje svetovnih energetskih potreb dovolj že približno 0,3 % svetovnih kopenskih površin. Tehnologije za izkoriščanje sončne energije ločimo na aktivne in pasivne. Aktivne vključujejo fotonapetostne sisteme (PV), koncentrirane sončne sisteme in solarne termalne kolektorje. Pasivne tehnike temeljijo na arhitekturnih rešitvah, ki omogočajo naravno prezračevanje in akumulacijo toplote s pomočjo materialov z visoko toplotno kapaciteto ter usmerjenostjo objektov glede na Sonce. Fotonapetostni sistemi pretvarjajo svetlobo neposredno v električno energijo s pomočjo fotonapetostnega učinka. Prvotno so se uporabljali za napajanje manjših naprav in oddaljenih objektov, danes pa je mogoče zaslediti milijone manjših strehnih naprav ter več gigavatov velikih solarnih elektrarn. Razmah tehnologije spremlja stalno zniževanje stroškov – cena elektrike iz novih sončnih elektrarn je v večini držav nižja od elektrike iz novih premogovnih ali plinskih virov.

Leta 2024 je sončna energija predstavljala 6,9 % svetovne proizvodnje elektrike, kar ustreza 2132 TWh. Skoraj polovica te energije je bila proizvedena z napravami na strehah, medtem ko je Kitajska

ustvarila več kot polovico svetovne rasti zmogljivosti. Zaradi padca stroškov, razširjene dostopnosti in prilagodljivosti sistemov postaja sončna energija temeljni vir razogljičenja svetovne energetike. Ključno vlogo pri širši uporabi sončne energije igra tudi možnost shranjevanja. Termalni sistemi uporabljajo vodo, kamen ali taline soli za shranjevanje toplote, kar omogoča premostitev nihanj v oskrbi. V PV sistemih presežek elektrike pogosto shranjujejo v baterijah ali pa se oddaja v omrežje, kjer jo lastniki prejmejo kot dobropis. Alternativno se uporablja tudi črpalna hidroelektrarna, kjer se voda črpa v višje ležeče rezervoarje in ob potrebi sprošča skozi turbine. Zgodovina razvoja solarnih tehnologij sega v 19. stoletje, vendar so se resneje začele uveljavljati po naftnih krizah v 70. letih prejšnjega stoletja. Sledile so javne raziskave in razvojne pobude, ter različni podporni programi, zlasti na Japonskem, v ZDA in Nemčiji. Fotovoltaični sistemi so od takrat postali ena najbolj razširjenih oblik proizvodnje elektrike brez emisij. Tehnologija se je izboljšala, stroški so padli, učinkovitost se je povečala, in sončna energija se vse pogosteje uvršča med najcenejše vire za nove energetske investicije.

Fotovoltaični sistemi so sestavljeni iz več komponent: solarnih panelov, ki sprejemajo sončno svetlobo, inverternikov, ki pretvarjajo enosmerni tok v izmenični, ter dodatnih elementov, kot so montažni sistemi, kabli in zaščitne naprave. Takšni sistemi delujejo brez hrupa in emisij toplogrednih plinov, zaradi česar veljajo za okolju prijazno tehnologijo. Z napredkom v proizvodnji in zmanjšanjem stroškov so PV sistemi postali dostopni za široko rabo, od malih sistemov na strehah posameznih hiš do velikih komercialnih sončnih parkov. Danes PV sistemi predstavljajo pomemben del svetovne energetske mešanice, saj proizvedejo že skoraj 7 % globalne električne energije. Poleg klasičnih stacionarnih sistemov se uporabljajo tudi sledilniki soncu, ki povečajo izkoristek s prilagajanjem položaja panelov glede na gibanje sonca.



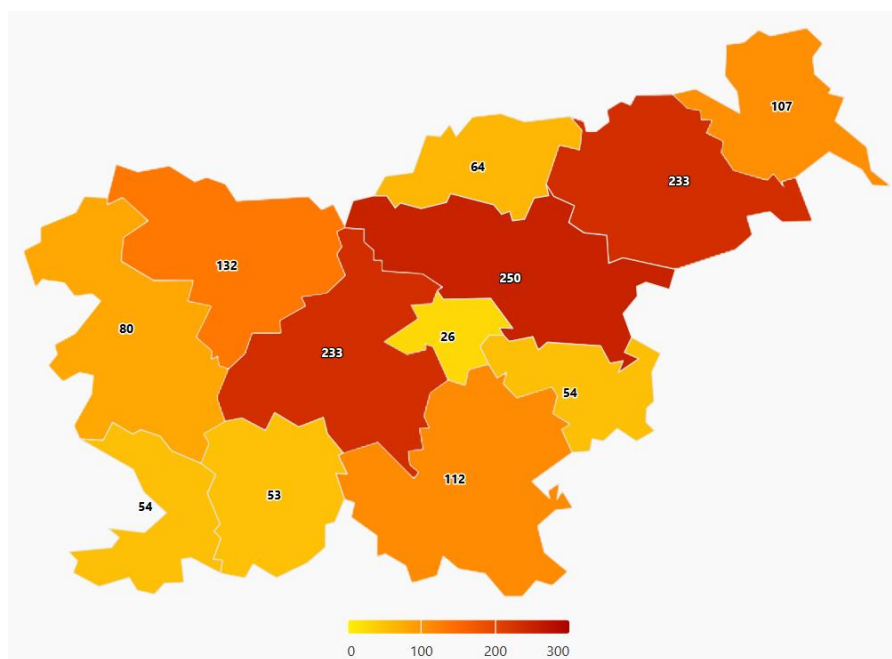
Slika 21: Shema osnovnega sistema sončne elektrarne.

(vir: https://www.researchgate.net/figure/Framework-for-evaluating-the-carbon-intensities-of-electricity-generation-supply-and_fig2_371827556)

Slika 21 prikazuje osnovni sistem sončne elektrarne z označenimi glavnimi komponentami in smerjo pretoka energije. Sončni žarki zadenejo sončne module (1), ki so sestavljeni iz fotovoltaičnih celic. Te celice pretvorijo sončno svetlobo neposredno v enosmerni električni tok (DC oz. »direct current«). Enosmerni tok (DC), ki ga proizvedejo moduli, teče do inverterja (2), kjer se pretvori v izmenični tok (AC oz. »alternative current«), saj je AC tok standardni način za distribucijo električne energije v gospodinjstvih in omrežju. AC tok nato potuje do varovalne omarice (3) z varovalkami, kjer se razporedi na gospodinjske naprave (npr. luči, računalnike) in se hkrati preverja, da sistem ostane varen pred morebitnimi električnimi napakami. Če je sistem opremljen z baterijo (4), ki sicer ni obvezna komponenta za delovanje, se presežna energija, ki je ni mogoče takoj porabiti, shrani za kasnejšo uporabo, npr. ponoči ali ob oblačnih dneh. Merilnik (5) beleži porabo in proizvodnjo elektrike ter omogoča, da presežek elektrike, ki ga sistem proizvede, oddajamo nazaj v električno omrežje (6). Hkrati

omrežje zagotavlja elektriko, če proizvodnja sončne elektrarne ne zadostuje. Električno omrežje (6) deluje kot varovalka in podpora, ki zagotavlja stabilnost oskrbe z elektriko. Pomemben vidik sončnih sistemov je shranjevanje energije. Ker je proizvodnja odvisna od dnevnega in sezonskega obsevanja, se presežki shranjujejo v baterijah ali drugih oblikah, kot so toplotne zaloge (npr. talni sistemi, stopljena sol). Sistem »net metering« omogoča gospodinjstvom in podjetjem, da presežke elektrike oddajajo nazaj v omrežje, kjer se vrednotijo in odštevajo od porabe. Ta način spodbudi uporabo obnovljivih virov in zniža stroške za končnega uporabnika.

Slovenija se je na področju sončne energije razvijala postopno, a je v zadnjih letih doživela pospešek, predvsem po letu 2009, ko so bili uvedeni sistem subvencioniranih odkupnih cen (feed-in tarife). Zaradi ugodnih pogojev in dostopnih kreditov se je število naprav hitro povečalo. Rast se je začasno upočasnila po spremembah podpornega sistema, vendar so po letu 2020 investicije znova narasle, predvsem zaradi padca cen panelov, večjega zavedanja o podnebnih spremembah in novih državnih spodbud. Prve sončne elektrarne so bile manjše in namenjene predvsem raziskavam ter individualni rabi. V zadnjem desetletju je zaradi povečane okoljske ozaveščenosti, subvencijskih politik in znižanja cen PV tehnologije prišlo do eksplozivne rasti števila sončnih elektrarn. Po podatkih Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani je Slovenija med državami z najhitrejšo rastjo na področju nameščenih kapacitet v EU. Po podatkih Agencije za energijo iz leta 2023 je bilo v Sloveniji več kot 40.000 sončnih elektrarn, večinoma na strehah stanovanjskih hiš. Skupna instalirana moč presega 800 MW, delež sončne energije v celotni proizvodnji elektrike pa narašča. Podatek iz konca leta 2024 pa kaže, da je skupna instalirana moč vseh sončnih elektrarn v Sloveniji znašala 1397 MW.



Slika 22: Sončne elektrarne po statističnih regijah.

(vir: <http://pv.fe.uni-lj.si/sl/podatki/stanje-se/#!>)

Največja sončna elektrarna v Sloveniji (po stanju iz leta 2024) je sončna elektrarna Prapretno, ki se nahaja na območju nekdanjega odlagališča pepela Termoelektrarne Trbovlje. Obratovati je začela leta 2022 - ima okoli 6700 panelov s katerimi doseže nazivno moč 3 MW. Po podatkih HSE (Holding Slovenske elektrarne) letno proizvede približno 3000 MWh, kar zadostuje za oskrbo več kot 800 gospodinjstev. S tem predstavlja pomemben mejnik v državni energetski neodvisnosti. Takšne elektrarne so pomembne za uravnoteženje omrežja in zmanjšanje odvisnosti od fosilnih goriv. Hkrati pa so majhne sončne elektrarne na strehah postale zelo priljubljene med gospodinjstvi. Povprečna slovenska družina lahko z namestitvijo sistemov moči okoli 5 kW proizvede 4000 do 5000 kWh elektrike letno, kar lahko pokrije tudi več kot polovico njihove letne porabe. S tem zmanjšajo stroške elektrike in prispevajo k zmanjševanju emisij CO₂. V Sloveniji se po sistemu net metering omogoča vračanje

presežne energije v omrežje, kar uporabnikom omogoča, da energijo, ki je ne porabijo takoj, oddajo v sistem in jo kasneje uporabijo. To prispeva k večji stabilnosti omrežja in zmanjšanju izgub pri prenosu. Številni uporabniki so tako postali aktivni proizvajalci elektrike, kar spodbuja razvoj lokalnih energetske samozadostnih skupnosti. Kljub srednjemu sončnemu obsevanju, ki je okoli 1000 kWh/m² na leto, ima Slovenija dobre pogoje za uporabo sončnih elektrarn, zlasti na območjih osrednje in južne Slovenije. Zaradi naraščajočih cen energije in rasti okoljske ozaveščenosti se pričakuje nadaljnji razvoj in širitev sončnih sistemov. Vlada in lokalne skupnosti spodbujajo projekte z raznimi finančnimi spodbudami, kar bo dodatno povečalo razširjenost in dostopnost te tehnologije. Celostno gledano sončna energija v Sloveniji pridobiva vedno večjo vlogo. Je eden od stebrov energetske tranzicije, ki vodi k zmanjšanju odvisnosti od fosilnih goriv in doseganju ciljev zmanjšanja emisij toplogrednih plinov. Tehnološki napredek, stabilna regulativa in povečano zanimanje uporabnikov zagotavljajo, da bo sončna energija tudi v prihodnosti pomemben del slovenske energetske krajine.



Slika 23: Sončna elektrarna Prapretno.

(vir: <https://www.hse.si/sl/se-prapretno/>)

Viri: [5][39][40][41][42][43][44]

BIOENERGIJA

Bioenergija predstavlja obliko obnovljive energije, ki temelji na izrabi organskih snovi rastlinskega ali živalskega izvora. Ključni vir bioenergije je biomasa – material, ki izvira iz nedavno živčih organizmov in se uporablja za pridobivanje toplote, elektrike ali goriv. V to skupino ne spadajo fosilna goriva, saj gre za geološko fosilizirane snovi. Pogosti viri biomase vključujejo les, kmetijske pridelke (kot sta koruza ali sladkorni trs), energetske rastline ter odpadke iz kmetijstva, gozdarstva, industrije in gospodinjstev. Bioenergija ima ob pravilnem upravljanju velik potencial za zmanjševanje izpustov toplogrednih plinov, vendar so lahko okoljski vplivi proizvodnje biomase precejšnji, zlasti če prihaja do prekomernega izkoriščanja zemljišč, zmanjšanja biotske raznovrstnosti ali neučinkovitega zgorevanja. Mednarodna agencija za energijo (IEA) v svojem scenariju ogljične nevtralnosti do leta 2050 predvideva popolno opustitev tradicionalne rabe biomase (kurjenje lesa, oglja ali gnoja na odprtem ognju) do leta 2030. Obenem naj bi se delež moderne bioenergije povečal z 6,6 % leta 2020 na 13,1 % leta 2030 ter na 18,7 % do sredine stoletja. Poročila Medvladnega foruma za podnebne spremembe (IPCC) večino podnebno nevtralnih poti vključujejo z bistveno vlogo bioenergije v skupni globalni energetski bilanci.

Za proizvodnjo bioenergije se uporabljajo različni postopki pretvorbe biomase. Toplotne metode, kot so piroliza^{*1}, uplinjanje^{*2} in torefakcija^{*3}, razgrajujejo organski material ob nadzorovanih temperaturah in količinah kisika. Kemične metode izvirajo iz postopkov predelave premoga, kot je Fischer-Tropscheva sinteza^{*4}, medtem ko biokemični postopki vključujejo uporabo mikroorganizmov za anaerobno digestijo, fermentacijo in kompostiranje. S temi procesi lahko iz odpadne biomase nastajajo goriva, kot so bioplín, bioetanol in biodizel.

^{*1} proces segrevanja biomase brez prisotnosti zraka ali z zelo nizko prisotnostjo kisika

^{*2} pretvorba biomase v visokokalorični plín

^{*3} pretvorba biomase v energijsko bolj gosto in stabilno obliko s segrevanjem v odsotnosti kisika

^{*4} industrijski kemični proces, s katerim se zmes ogljikovega monoksida in vodika pretvori v tekoče ogljikovodike – bencín, plínsko olje in maziva



Slika 24: Reaktor za torefikacijo pri proizvodnji biopremoga.

(vir: <https://nextfuel.com/torrefaction-technology>)

Na sliki levo rotacijski bobenski reaktor predeluje različne biomasne materiale, vključno z energetske rastlinami, kot je slonova trava, kmetijskimi odpadki in gozdarskimi odpadki, ter jih s pomočjo nadzorovanega procesa karbonizacije, imenovanega torrefikacija, pretvarja v biopremog.

Po namenu rabe ločimo bioenergijo za ogrevanje ter biogoriva za promet. Ogrevalni sistemi na biomaso so lahko popolnoma avtomatizirani, uporabljajo sekance, pelete ali delujejo kot kombinirani sistemi za proizvodnjo toplote in elektrike (CHP). Med biogorivi razlikujemo prve generacije (npr. bioetanol iz sladkornega trsa ali koruze in biodizel iz oljne ogrščice) ter druge generacije, ki temeljijo na odpadnih surovinah in ne tekmujejo neposredno s pridelavo hrane. Primeri vključujejo celulozne materiale iz trave, dreves in kmetijskih ostankov, iz katerih se lahko s fermentacijo ali uplinjanjem proizvedejo goriva za vozila ali elektrarne. Kljub prednostim bioenergije so njeni izkoristki glede površinske energijske gostote nizki. Povprečna življenjska energijska gostota biomase znaša le okoli $0,3 \text{ W/m}^2$, medtem ko ima sončna energija denimo več kot 5 W/m^2 . To pomeni, da za enako količino proizvedene energije potrebujemo bistveno večje površine, kar lahko vodi v konflikte z rabo zemljišč za pridelavo hrane, varovanje naravnih ekosistemov ali urbanizacijo. V državah, kot so ZDA, Brazilija ali Indonezija, se je že pojavila praksa izsekavanja gozdov za pridelavo sladkornega trsa ali palm za biodizel, kar dolgoročno lahko povzroča večje izpuste CO_2 kot uporaba fosilnih goriv.

V prihodnosti se obeta širša raba naprednih konceptov, kot je bioenergija s tehnologijo zajema in shranjevanja ogljika (v nadaljevanju BECCS). Gre za proces, kjer se po zgorevanju biomase ujame del nastalega CO_2 in trajno shrani v geološke plasti. Teoretično BECCS omogoča negativne emisije – več CO_2 se odstrani iz ozračja, kot ga nastane. A ta tehnologija je trenutno še v začetni fazi razvoja, njena širitev pa je omejena zaradi visokih stroškov in velike porabe biomase, kar lahko dodatno ogrozi prehransko varnost in biotsko raznovrstnost.



Slika 25: Biogoriva se pridobivajo predvsem iz kmetijskih odpadkov.

(vir: <https://theaseanpost.com/article/biofuel-alternative-energy-source-southeast-asia>)

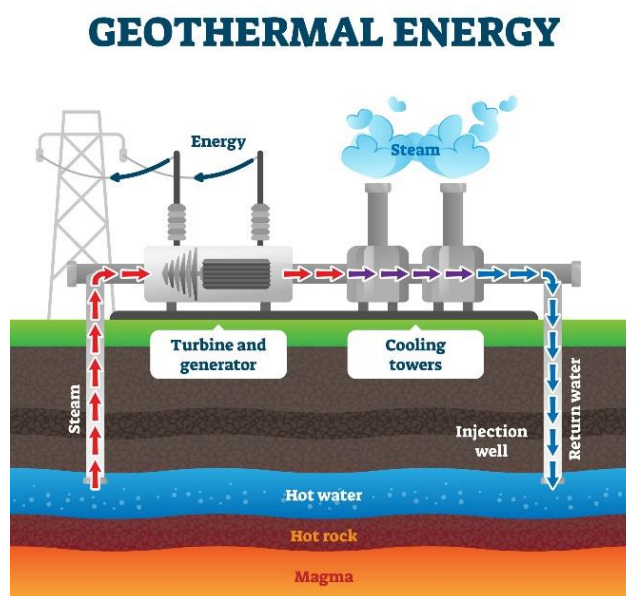
Leta 2020 je svetovna proizvodnja bioenergije znašala 58 EJ (= 58.000.000.000 GJ = $58 \cdot 10^{18}$ J), kar je približno tretjina količine energije, proizvedene iz nafte. Večina bioenergije še vedno izvira iz gozdov, zlasti v obliki lesnih ostankov in peletov. Kljub temu je prihodnja širitev sektorja omejena – že danes se skoraj vsi žagarski ostanki uporabljajo, kar pomeni, da bi bilo za povečanje proizvodnje treba več posegati v gozdove. To pa zmanjšuje njihovo sposobnost dolgoročnega shranjevanja ogljika. V okoljskem smislu je učinek bioenergije močno odvisen od konkretnega načina pridelave in uporabe. Uporaba lesnih ostankov ali odpadkov ima nižji ogljični odtis, saj bi ti materiali sicer razpadli in oddali ogljik v ozračje. Nasprotno pa intenzivna raba kmetijskih površin za energetske namene lahko vodi do degradacije tal, večje porabe vode in umetnih gnojil ter ogroža lokalne skupnosti. Bioenergija ima torej pomemben potencial pri prehodu v nizkoogljično družbo, a njena trajnost ni samoumevna. Učinkovitost, pravičnost in dolgoročna vzdržnost njene rabe bodo odvisne od načina pridelave biomase, tehnoloških rešitev za zajem ogljika in usklajenega upravljanja rabe zemljišč na svetovni ravni.

Viri: [5][19][22][38]

GEOTERMALNA ENERGIJA

Geotermalna energija je oblika obnovljive energije, ki temelji na izkoriščanju toplote, shranjene v notranjosti Zemlje. Ta toplota izvira iz ostankov toplotne energije, ki je nastala ob oblikovanju planeta, ter iz neprestanega radioaktivnega razpada naravno prisotnih izotopov v zemeljski skorji in plašču. Energetsko gledano gre za vir z ogromnim teoretičnim potencialom, saj skupna količina geotermalne energije presega globalne potrebe po energiji več desetmilijardkrat. Vendar pa je tehnično in ekonomsko dostopna le majhna frakcija tega potenciala.

Geotermalna energija se pridobiva z izkoriščanjem naravno vroče vode ali pare, ki se nahaja v hidrotermalnih rezervoarjih, ali z ustvarjanjem umetnih rezervoarjev v suhih vročih kamninah – torej z uporabo t. i. izboljšanih geotermalnih sistemov (EGS oz. »Enhanced Geothermal System«). Načini izrabe se razlikujejo glede na temperaturo in agregatno stanje rezervoarjev ter globino in geološko strukturo nahajališč. V osnovi pa vsi sistemi delujejo po istem principu: toplota se iz zemlje prenese na delovno tekočino (običajno voda), ki se upari in preko turbine poganja generator za proizvodnjo električne energije, pri čemer se nato ohlajena tekočina ponovno vrne v podzemlje. Obstajajo tri osnovne vrste geotermalnih elektrarn: suhi parni sistemi, kjer naravna para poganja turbine; sistemi z bliskovitim izparevanjem (flash steam), kjer visokotemperaturna voda pod pritiskom ob zmanjšanju tlaka upari in ta para žene turbine; ter binarni sistemi, ki uporabljajo sekundarni delovni fluid z nižjo temperaturo vrelišča, ki se upari ob stiku s toplo vodo in s tem poganja turbine. Binarni sistemi so danes najpogostejše uporabljeni za nižjetemperaturne vire in omogočajo širšo geografsko razširjenost uporabe geotermije.

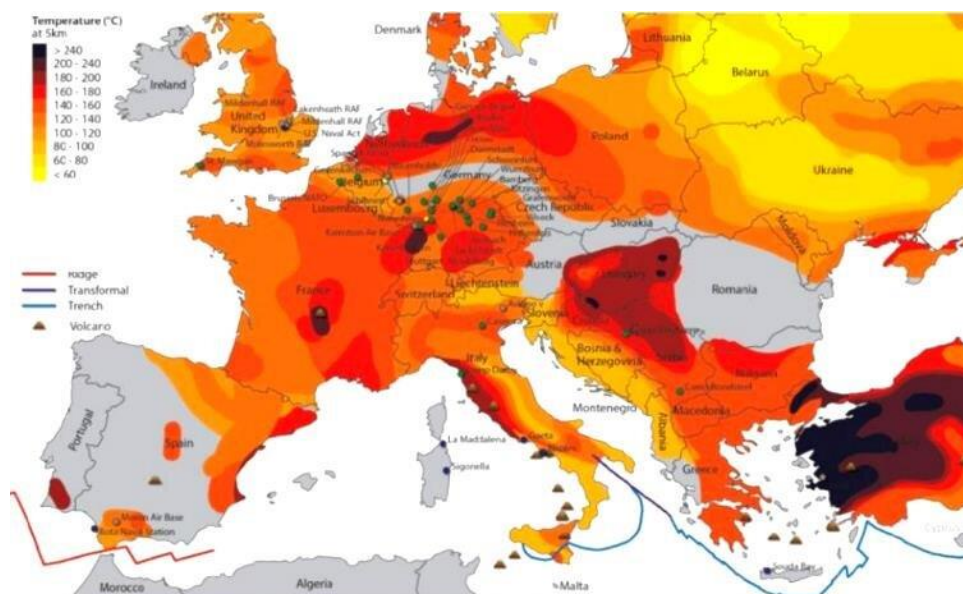


Slika 26: Shema geotermalne elektrarne.

(vir: fourcornerscleanenergyalliance.org/exploring-geothermal-energy)

Globalno je bilo do leta 2024 nameščenih okoli 16,7 GW geotermalne električne zmogljivosti, pri čemer največji delež prispevajo Združene države Amerike, Indonezija, Filipini, Kenija in Islandija. V teh državah predstavlja geotermalna energija pomemben delež v elektroenergetskem miksu – denimo na Islandiji skoraj 27 %, v Keniji kar 34 %. Potencial pa ni omejen le na območja z naravno prisotnimi vrelni in gejzirji. Z razvojem tehnologij, predvsem EGS in zaprtih sistemov (closed-loop), se možnost izkoriščanja širi tudi na območja brez naravno prisotnih vodonosnikov ali pare. Tehnološki napredek, zlasti na področju vrtanja in upravljanja s toploto, je v zadnjih desetletjih močno zmanjšal stroške geotermalne energije. Strošek proizvodnje elektrike iz geotermalne elektrarne, zgrajene danes, znaša približno 0,05 USD/kWh, kar je konkurenčno z ostalimi obnovljivimi viri. Kapitalni stroški sicer ostajajo visoki – v povprečju od 2 do 5 milijonov evrov na megavat inštalirane moči – vendar so nizki obratovalni stroški in zanesljivost delovanja velik izravnalni faktor. Geotermalne elektrarne namreč delujejo neodvisno od vremenskih razmer, 24 ur na dan, 365 dni v letu, z visokimi kapacitetskimi faktorji in stabilnim izhodom.

Med ključnimi prednostmi geotermalne energije so: minimalne emisije toplogrednih plinov (povprečno 45 g CO₂/kWh, kar je manj kot 5 % emisij premogovnih elektrarn), nizka raba zemljišč in vode v primerjavi z drugimi viri (geotermalne elektrarne porabijo 20 L vode/MWh, medtem ko jih jedrske in fosilne elektrarne porabijo več kot 1000 L), lokalna uporaba brez potrebe po transportu energije, dolgo življenjsko dobo elektrarn in nizki stroški vzdrževanja. Po drugi strani pa obstajajo tudi omejitve in slabosti, ki zavirajo širšo uporabo geotermije. Največja ovira so visoki začetni stroški raziskav in vrtanja, z visoko stopnjo negotovosti – neuspešni vrtni projekti so dragi, tveganje pa odvrne mnoge vlagatelje. Poleg tega se geotermalna energija lahko učinkovito izkorišča le na območjih z ustrezno geologijo: visoka toplotna gradienta, dovolj plitve vroče kamnine ali vodonosniki, ter ustrezna prepustnost kamnin. Tudi okoljski vplivi niso zanemarljivi – med najpogostejšimi so izpusti vodikovega sulfida, sproščanje težkih kovin in usedline, kot tudi mikropotresi, ki se lahko pojavijo pri frakturiranju kamnin v sistemih EGS. Vendar sodobne metode, kot so zaprtocirkulacijski sistemi brez stika z okoljem, obetajo zmanjšanje teh vplivov na minimum.



Slika 27: Geotermalni zemljevid Evrope – vidni potencial za izkoriščanje geotermalne energije.

(vir: https://www.researchgate.net/figure/Geothermal-map-of-Europe-5-km-Source-US-DOE-NREL-2010_fig2_383001311)

Kar zadeva Slovenijo, geotermalna energija še ne predstavlja pomembnega vira električne energije, kljub dejstvu, da je njen geotermalni potencial prisoten, zlasti v vzhodnem delu države, kjer so temperature geotermalnih vod višje in je že razvita raba za toplotno ogrevanje. Geološke raziskave

so pokazale, da imamo v globinah do 3.000 metrov možnost črpanja vroče vode z zadostno temperaturo za ogrevanje. Vendar so za izkoriščanje za proizvodnjo elektrike običajno potrebne temperature nad 150–200 °C, kar v Sloveniji ni pogosto naravno prisotno. Obstaja pa možnost uporabe nizkotemperaturnih binarnih sistemov, ki so primerni za temperature od 70 do 120 °C. Tako bi bila realna možnost razvoja manjših geotermalnih elektrarn za lokalno oskrbo, hkrati pa bi lahko povečali rabo geotermalnih virov za daljinsko ogrevanje, predvsem v Pomurju in Podravju. Geotermalna energija v Sloveniji trenutno največ prispeva k toplotni oskrbi (ogrevanje objektov, bazenov, rastlinjakov) in sicer z izkoriščanjem termalnih vod, denimo v Moravcih, Lendavi, Radencih, Banovcih in drugod. Vendar pa potencial ostaja delno neizkoriščen. Priložnost za prihodnost predstavljajo investicije v raziskave, pilotne projekte binarnih elektrarn in razvoj strategij za geotermalno ogrevanje mest. Glede na ambicije Slovenije po povečanju deleža obnovljivih virov do leta 2030, bi širša raba geotermije lahko postala pomemben člen energetske tranzicije, še posebej v kombinaciji z drugimi lokalnimi obnovljivimi viri.

Lahko rečemo, da geotermalna energija predstavlja enega najbolj zanesljivih, okoljsko prijaznih in dolgoročno stabilnih virov energije, ki pa zahteva tehnološko dovršenost in skrbno načrtovanje. Zaradi svojih fizikalnih značilnosti je primerna predvsem za bazno proizvodnjo električne energije in stalno ogrevanje, kjer lahko dopolnjuje druge, bolj sezonsko odvisne vire, kot sta sonce in veter. Prihodnji razvoj bo v veliki meri odvisen od ekonomike vrtanja, uspešnosti EGS in politične volje za vlaganje v manj tradicionalne vire energije. Za Slovenijo to pomeni predvsem priložnost za decentralizirano, lokalno energetsko oskrbo z minimalnim vplivom na okolje in zanesljivostjo, ki jo druge oblike OVE težko zagotavljajo.

Viri: [5][19][22][38][40]

ENERGIJA PLIMOVANJA

Energija plimovanja (ali energije bibavice) je oblika obnovljive energije, ki izkorišča redno in predvidljivo spreminjanje morske gladine, povzročeno z gravitacijskim privlakom Lune in Sonca ter rotacijo Zemlje. V nasprotju z drugimi viri, kot sta veter in sonce, ki sta podvržena kratkoročnim vremenskim in podnebnim spremembam, plimovanje sledi natančnemu astronomsko določenemu ciklu, zaradi česar je energija plimovanja ena najbolj zanesljivih oblik obnovljivih virov energije. Način delovanja plimskih elektrarn temelji na pretvarjanju potencialne ali kinetične energije plimovanja v električno energijo. Obstajajo štiri osnovne metode izkoriščanja plimovanja: plimski jezovi (barrages), plimske lagune, tokovni generatorji (tidal stream generators) in konceptualna dinamična plimska energija (dynamic tidal power). Vsaka metoda izkorišča različne vidike gibanja vode, vendar je osnovno načelo skupno – uporaba turbin za pogon električnih generatorjev. Najbolj tradicionalna oblika je plimski jez, ki deluje kot pregrada v ustju reke ali zalivu. Ko nastopi visoka plima, voda priteče v bazen za jezom in se tam zadrži. Ko plima upade, se voda spušča skozi turbine, ki poganjajo generatorje.

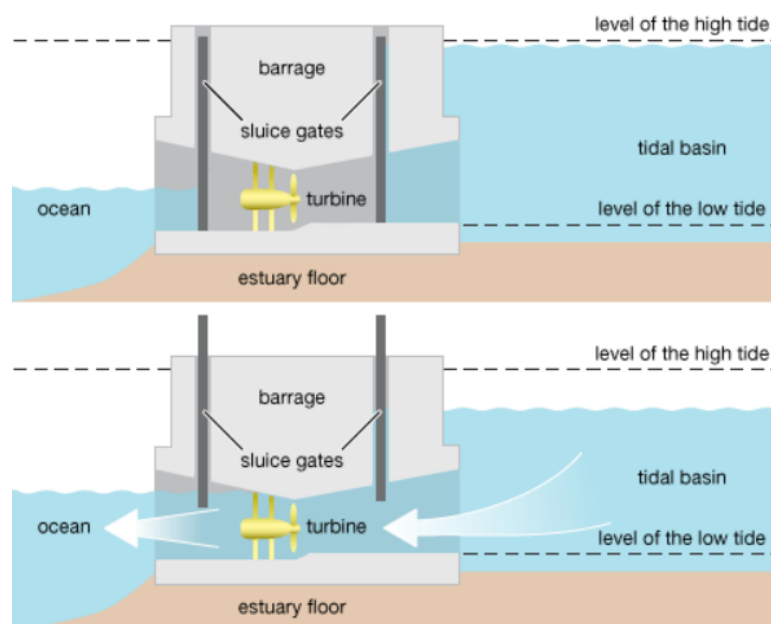
Prva in še danes ena največjih tovrstnih elektrarn je bila zgrajena leta 1966 v Franciji na reki Rance in ima nazivno moč 240 MW. Leta 2011 jo je presegla elektrarna na jezeru Sihwa v Južni Koreji s 254 MW. Tokovni plimski generatorji izkoriščajo kinetično energijo morskih tokov, ki nastanejo zaradi plimovanja. Delujejo podobno kot vetrne turbine, le da so nameščeni pod vodno gladino, kjer hitrosti toka dosežejo 2–4 m/s. Takšni sistemi imajo relativno majhen vpliv na okolje in omogočajo integracijo v obstoječe strukture, kot so mostovi ali pristaniške konstrukcije. Prva takšna komercialna in v omrežje priključena naprava, imenovana SeaGen, je bila nameščena v Strangford Loughu na Severnem Irskem. Novejše metode, kot je plimska laguna, vključujejo gradnjo umetnih obodov z vgrajenimi turbinami. Prednost teh je, da ne posegajo v naravne estuarije, kar zmanjša okoljski vpliv. Podobno ambiciozna, a še teoretična je dinamična plimska energija, kjer bi zgradili zelo dolge pregrade pravokotno na obalo,

s čimer bi ustvarili razliko v fazi plimovanja na obeh straneh pregrade, kar bi omogočilo izkoriščanje tako potencialne kot kinetične energije.



Slika 28: Plimska elektrarna Sihwa, ki se nahaja v južnokorejski provinci Gyeonggi, je največja plimska elektrarna na svetu, saj ima skupno nazivno moč 254 MW.

(vir: <https://www.shutterstock.com/search/tidal-power-plant>)



Slika 29: Shema plimske elektrarne z jezom.

(vir: <https://www.britannica.com/science/tidal-power>)

Na prikazani shemi je prikazan princip delovanja plimske elektrarne s pomočjo plimskega jezusa (barrage), ki izkorišča razliko v višini morske gladine med plimo in oseko za proizvodnjo električne energije. Sistem vključuje več ključnih sestavnih delov: pregrado oziroma jez (barrage), zapornice (sluice gates), turbino (turbine), estuarijsko dno (estuary floor), ocean ter bazen za zadrževanje vode oziroma plimski bazen (tidal basin). Prikaz vključuje dve fazi cikla – stanje ob visoki plimi in fazo izkoriščanja energije ob upadanju plime. Na zgornjem delu slike je prikazano stanje, ko je morska gladina na strani oceana višja kot v plimskem bazenu, kar pomeni, da je nastopila visoka plima (high tide). Zapornice (sluice gates) so v tem trenutku zaprte, kar preprečuje pretok vode skozi turbino. Voda

se zato kopiči na oceanski strani jezua in ustvarja potencialno energijo zaradi višinske razlike med oceanom in bazenom. Turbina v tem trenutku miruje, saj ni pretoka vode. Na spodnjem delu slike je prikazana druga faza delovanja – ko se plima začne umikati in nivo oceanske vode pade. Ko gladina v oceanu pade pod raven vode v plimskem bazenu, se zapornice odprejo in voda iz bazena začne iztekati nazaj v ocean. V tem trenutku se sproži pretok vode skozi turbino, ki se zaradi tega začne vrteti. Mehanska energija vrtljivega gibanja se nato pretvori v električno energijo s pomočjo generatorja, ki je povezan s turbino. Na ta način se izkorišča razlika v višini morske gladine med plimo in oseko – torej potencialna energija vode – za proizvodnjo elektrike. Ta proces je odvisen od pravilnega časovnega upravljanja zapornic, ki omogočajo, da se voda ujame med visoko plimo in sprosti med oseko. Učinkovitost sistema je odvisna od velikosti plimskih razlik, saj večja kot je razlika med visoko in nizko vodo, več energije je mogoče pridobiti. Prednost takega sistema je v njegovi predvidljivosti, saj je plimovanje natančno določeno z gibanjem Lune in Sonca.

Zaradi fizikalne narave plimovanja je gostota energije v vodi skoraj 800-krat večja kot pri vetru, kar pomeni večjo učinkovitost turbin in manjše prostorske zahteve. Poleg tega je plimovanje ciklično in predvidljivo, kar pomeni, da plimske elektrarne lahko zagotavljajo stabilno bazično obremenitev (baseload power), kar je ključna prednost pred solarnimi in vetrnimi viri. Vendar pa tehnologija še vedno ni široko razširjena. Glavni izzivi vključujejo visoke začetne stroške izgradnje, omejeno število ustreznih lokacij (zahteva velike amplitude plimovanja in/ali ozke kanale z močnim tokom), ter korozivne učinke morske vode, ki zmanjšujejo življenjsko dobo opreme in povečujejo stroške vzdrževanja. Dodatno je potrebno upoštevati okoljski vpliv na morske ekosisteme – od potencialnega poškodb rib in morskih sesalcev v turbinah, do sprememb v sedimentaciji, slanosti in cirkulaciji v zalivih. Kljub tem izzivom se globalno razvija vse več projektov. Poleg Francije in Južne Koreje, ki sta pionirki na tem področju, se raziskave in pilotni projekti odvijajo tudi v Veliki Britaniji (EMEC na Orkneyju), Kanadi (Bay of Fundy), na Norveškem, v ZDA, na Kitajskem in Indiji. Med obetavnejšimi je projekt MeyGen na Škotskem, ki ima predvideno skupno moč 398 MW, od katerih je trenutno v obratovanju že 6 MW. Podoben projekt je bil načrtovan tudi pri Swansea Bay v Walesu, vendar je bil zaradi stroškov in okoljske zaskrbljenosti leta 2018 opuščen. Poleg tehničnih in okoljskih izzivov so tudi ekonomski – visoki začetni vložki (več sto milijonov evrov) odvrnejo mnoge vlagatelje, še posebej ker tehnologija še ni široko uveljavljena in ni dosegla ekonomije obsega. Kljub temu pa zaradi naraščajoče potrebe po zanesljivih virih brez emisij CO₂, ter vse bolj naprednih turbin in materialov, upanje za povečano implementacijo ostaja. Posebno obetavna so raziskovanja na področju kompozitnih materialov, ki bi zmanjšali težave s korozijo, pa tudi izboljšane oblike turbin, ki so učinkovitejše pri nižjih hitrostih toka.

In kaj Slovenija? Glede na svojo geografsko lego in izjemno kratko morsko obalo (46,6 km), predvsem pa zaradi nizke amplitude plimovanja v Jadranu, ki znaša le nekaj decimetrov, energija plimovanja pri nas ni primerna za izkoriščanje. V Sloveniji nimamo plimskih elektrarn, prav tako ni znanih resnih študij ali načrtov za njihovo izgradnjo. Viri plimovanja ostajajo omejeni na regije z izrazitimi plimskimi razlikami (nad 4–5 metrov), kot so obale Atlantskega oceana, Tihega oceana, ter nekateri zalivi in fjordi, kjer so lahko lokalni pogoji (ozki prehodi, hitri tokovi) zelo primerni.

Za prihodnost bo razvoj plimske energije v veliki meri odvisen od politične podpore, vlaganj v raziskave in razvoja ter izboljšanja razmerja med stroški in koristmi. Čeprav trenutni delež plimske energije v svetovni proizvodnji elektrike ostaja zanemarljiv, ima zaradi svoje predvidljivosti, nizkega ogljičnega odtisa (v povprečju ~24 gCO₂-eq/kWh) in velikega potenciala v določenih geografskih območjih pomembno vlogo v paleti obnovljivih virov, še posebej kot dopolnilo nestanovitnejšim virom kot sta veter in sonce. Energija plimovanja torej ostaja zanimiva, a specializirana veja obnovljivih virov – s potencialom, ki bo lahko pomembno prispeval k trajnostni energetski mešanici prihodnosti, predvsem v državah z ugodnimi naravnimi pogoji in zmožnostjo vlaganj v infrastrukturne projekte velikih razsežnosti.

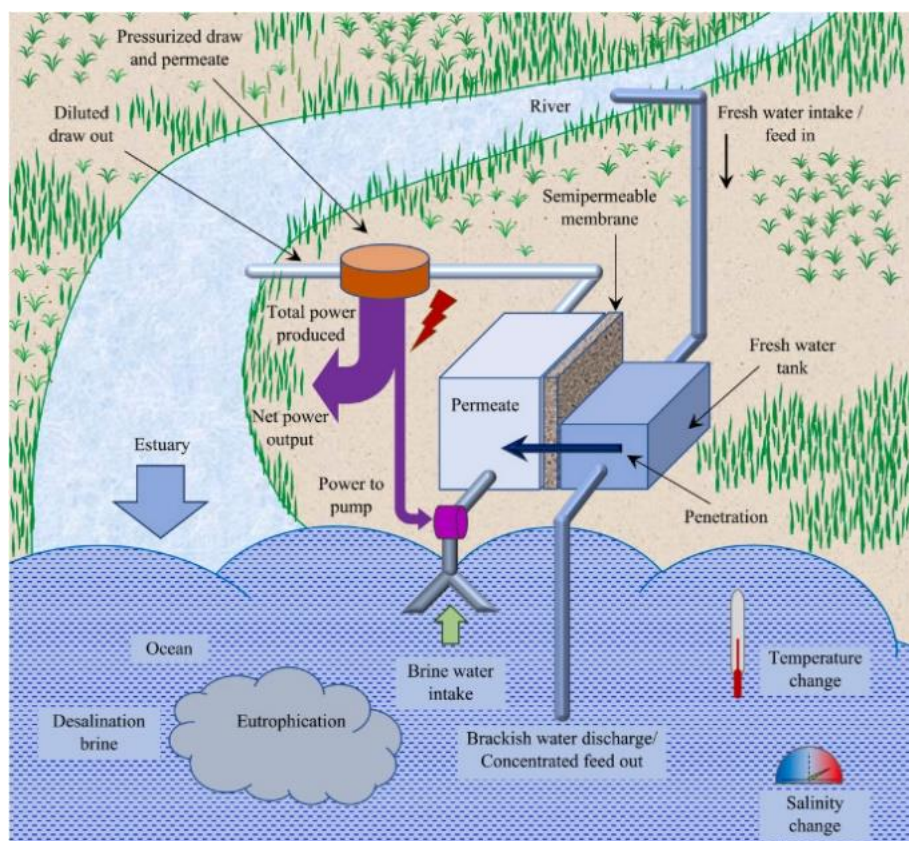
Viri: [5][19][22][38][47][49]

ENERGIJA OSMOZE

Energija osmoze, znana tudi kot energija slanostnega gradienta ali "modra energija", je obnovljiv vir energije, ki izkorišča razliko v koncentraciji soli med morskno in sladko vodo. Temelji na naravnem fizikalno-kemijskem pojavu – osmozi – kjer voda skozi polprepustno membrano spontano prehaja iz območja z nižjo koncentracijo topljenca (sladka voda) v območje z višjo koncentracijo (slana voda). Ta tok vode ustvarja osmotni tlak, ki ga je mogoče pretvoriti v mehansko ali električno energijo.

Najbolj razviti tehnološki pristopi za izkoriščanje te energije sta tlačno zakasnjena osmoza (PRO) in reverzna elektrodializa (RED). Pri PRO sistemih morska voda vstopi v tlačno komoro, kamor skozi membrano vstopa tudi sladkovoda. Ko sveža voda prodre v komoro, se njen volumen in tlak povečata, kar poganja turbino in proizvaja elektriko. RED pa uporablja zaporedje izmenično nameščenih membran za izmenjavo kationov in anionov. S tem se ustvari električni tok med rečnim in morskim okoljem, ki deluje podobno kot solna baterija.

Osmotska energija je že bila potrjena v laboratorijih in pilotnih projektih. Najbolj znan poskus komercializacije je bil norveški projekt podjetja Statkraft, ki je v bližini Osla postavil prototipno elektrarno na osnovi PRO. Kljub začetnim obetom je bila leta 2014 prekinjena zaradi nizke ekonomičnosti – razlika v slanosti med morskno in rečno vodo ni ustvarila zadostnega osmotnega tlaka za konkurenčno proizvodnjo električne energije. Povečano zanimanje pa obstaja za izkoriščanje virov z višjim slanostnim gradientom, kot so geotermalne slanice ali odpadne vode iz postopkov razsoljevanja. Dansko podjetje SaltPower že razvija prvo komercialno enoto na osnovi takih virov. Nekaj pozornosti je pritegnila tudi kapacitivna metoda, kjer se izmenično polnijo in praznijo elektrode v stiku z morskno in rečno vodo, kar omogoča ekstrakcijo električne energije iz sprememb v ionski koncentraciji. Čeprav je trenutno ta metoda v zgodnji fazi raziskav, ima potencial za visoko učinkovitost, zlasti pri uporabi nanostrukturiranih materialov, kot so borov nitridni nanocevki. Raziskave kažejo, da bi lahko kvadratni meter takšne membrane teoretično proizvedel okoli 4 kW moči, kar je bistveno več od obstoječih osmotskih sistemov.



Slika 30: Procesi v osmozni elektrarni.

(vir: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/osmotic-power>)

Slika 30 prikazuje delovanje sistema za pridobivanje energije iz osmoze, natančneje z uporabo metode tlačno zakasnjene osmoze (PRO – Pressure Retarded Osmosis). Gre za proces, ki temelji na izkoriščanju naravne razlike v koncentraciji soli med sladko rečno in slano morsko vodo. Na desni strani slike je prikazana reka, ki dovaja sladko vodo v sistem. Ta voda se preko dovodnega kanala črpa v rezervoar s sladko vodo, iz katerega nato prehaja skozi polprepustno membrano. Membrana prepušča le molekule vode, ne pa ionov, zaradi česar se zaradi osmotnega tlaka sveža voda premika v smeri proti slani vodi. Na levi strani sistema se nahaja komora, napolnjena s slano vodo, pridobljeno iz morja oziroma iz desalinizacijskih tokov, kjer je slanost visoka. Ko sveža voda prehaja skozi membrano v komoro s slano vodo, se njen volumen poveča, kar povzroči dvig tlaka v tej komori. Ta tlak se uporabi za pogon turbine, ki proizvaja električno energijo. Del proizvedene energije se vrača v sistem za delovanje črpalk in obtok tekočin, ostanek pa predstavlja neto izhodno moč sistema, ki je na voljo za nadaljnjo rabo. Stranski produkt tega procesa je brakična voda, torej voda s srednjo koncentracijo soli, ki nastane z mešanjem sladke in slane vode. Ta voda se nato iz sistema odvaja nazaj v morje. Na spodnjem delu slike so prikazani možni vplivi na okolje, povezani s tovrstnim postopkom, kot so spremembe slanosti in temperature v obalnem morskem okolju, možnost evtrofikacije ter vplivi izpusta desalinizacijskih slanic. Vnosne in izhodne cevi, povezane z oceanom, tako omogočajo kroženje slane vode, vendar tudi zahtevajo nadzor nad ekološkimi vplivi na morski ekosistem. Proces ne vključuje zgorevanja goriv, temveč uporablja naravno fizikalno lastnost vodnih raztopin, kar ga uvršča med nizkoogljive in potencialno trajnostne vire energije. Kljub temu pa iz slike izhaja, da učinkovitost sistema in njegova okoljska skladnost zahtevata natančno in tehnično zahtevno upravljanje, še posebej pri obravnavi odpadne brakične vode in prihrankov energije v primerjavi s potrebami po črpanju.

Učinkovitost osmotske energije je teoretično visoka. Študija Univerze Yale iz leta 2012 je pokazala, da je mogoče v idealnih pogojih pri metodi PRO izkoristiti do 91 % razpoložljive prostozmešne energije, kar pomeni približno 0,75 kWh na kubični meter mešanice morske in rečne vode. Vendar pa obstajajo tudi pomembne omejitve. Glavna tehnična ovira so visoki stroški membran, njihova dolgotrajna stabilnost in občutljivost na onesnaževala. Poleg tega osmotska energija proizvaja slanico oziroma rahlo slano vodo kot stranski produkt. Če se ta izpušča nekontrolirano v okolje, lahko povzroči spremembe v lokalnih ekosistemih, saj organizmi običajno tolerirajo le določene razpone slanosti. Zlasti občutljive so vrste, ki naseljujejo sladkovodne izlive rek v morje. Okoljski vpliv je sicer mogoče ublažiti s kontroliranim odvajanjem odpadne vode v vmesne morske plasti, stran od površinskega in talnega habitata. Zaradi velikih količin morske in rečne vode, ki jih je treba črpati za delovanje PRO ali RED sistemov, so potrebni kompleksni in strogo regulirani vnosni objekti, ki morajo zadostiti številnim okoljskim zahtevam, kar še dodatno otežuje njihovo širšo uporabo. Pridobivanje dovoljenj za takšne objekte lahko traja tudi do več let.

Z vidika trajnosti je energija osmoze privlačna, saj temelji na naravnem procesu mešanja rek in oceanov, ki se že spontano dogaja, ne vključuje zgorevanja goriv in ne povzroča neposrednih emisij CO₂. Poleg tega nima stroškov za gorivo, saj uporablja dostopne naravne vire. Vendar pa je zaradi nizke energijske gostote (v primerjavi s fosilnimi gorivi ali jedrsko energijo) in visokih kapitalskih stroškov zaenkrat le dopolnilni vir energije. Njena ekonomska upravičenost se znatno poveča le v primerih, kjer je na voljo visoka razlika v slanosti ali ob povezavi z drugimi postopki, kot je razsoljevanje. Ocenjeni globalni teoretični potencial osmotske energije znaša več sto gigavatov, kar pomeni, da ima dolgoročno vlogo pri dekarbonizaciji energetskega sektorja, zlasti v obalnih državah z bogatim izlivnim omrežjem. Vendar bo njen dejanski prispevek k energetski mešanici odvisen predvsem od napredka na področju membranske tehnologije, zniževanja stroškov in upravljanja z okoljskimi vplivi.

Sklepno lahko rečemo, da je osmotska energija konceptualno trajnostna in okoljsko sprejemljiva tehnologija, ki pa se sooča z izzivi učinkovitosti, stroškov in kompleksnosti implementacije. Njena prihodnost je tesno povezana z razvojem naprednih materialov in inovativnih sistemskih integracij, ki bodo omogočili konkurenčnost v primerjavi z uveljavljenimi obnovljivimi viri.

Viri: [5][19][22][38][56]

Pomen uporabe trajnostnih tehnologij za prihodnost

Obnovljivi viri energije so pogosto v središču razprav, medtem ko trajnostne tehnologije zaradi svoje kompleksnosti ostajajo spregledane. Kljub temu so vredne razmiselka, saj predstavljajo učinkovite rešitve izzivov trajnostnega razvoja. Njihova uporaba omogoča inovativne pristope k pridobivanju energije in izboljšanju energetske učinkovitosti, kar ne le zmanjšuje okoljski vpliv, temveč tudi prispeva k gospodarski stabilnosti in energetske neodvisnosti na globalni ravni.

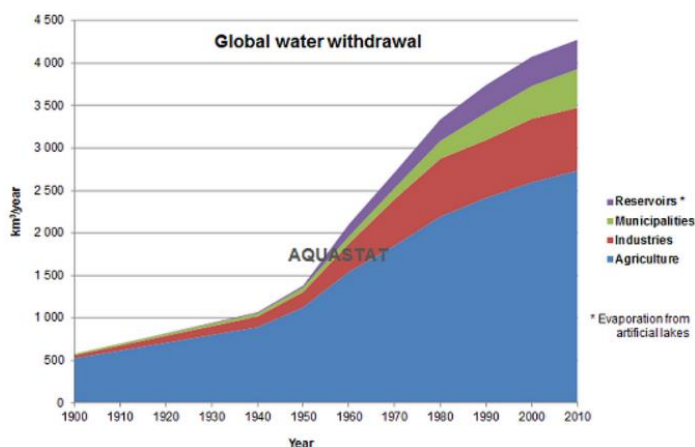
Energetska učinkovitost postaja osrednji dejavnik pri optimizaciji rabe energije in zmanjševanju porabe. Napredne tehnologije, kot so elektrifikacija, zajemanje ogljika in uporaba vodika, igrajo ključno vlogo pri zmanjševanju izpustov v industriji in drugih težko dekarbonizirajočih sektorjih. Kljub temu se trenutno le četrtnina javnih sredstev za raziskave in razvoj nizkoogljicnih tehnologij namenja področjem, kot so CCUS, elektrifikacija in vodik, kar kaže na potrebo po večjih investicijah če želimo doseči neto ničelne izpuste. Za doseg dolgoročnih trajnostnih ciljev bo nujen razvoj širokega nabora tehnologij in strategij, saj bo le kombinacija različnih pristopov omogočila prehod v čistejši in bolj trajnostni energetski sistem.

Viri: [23][30][47]

Primeri trajnostnih tehnologij in njihova uporaba

TRAJNOSTNE TEHNOLOGIJE V KMETIJSTVU

Kmetijstvo že desetletja predstavlja največjega porabnika sladke vode na globalni ravni, kar potrjuje tudi analiza podatkov iz baze AQUASTAT, prikazana v grafu »Global water withdrawal« (Slika 30). Iz grafa je razvidno, da se je skupna poraba vode med letoma 1900 in 2010 eksponentno povečala, pri čemer je kmetijstvo stalno ohranjalo največji delež – v nekaterih obdobjih več kot 60 % celotnega odvzema vode. Najbolj intenzivno rast porabe je mogoče opaziti po letu 1950, ko so zaradi povečane prehranske potrebe in industrializacije kmetijstva države začele množično širiti namakalne sisteme, kar je dodatno obremenilo že tako omejene vodne vire. V kmetijstvu se voda največ porablja za namakanje poljščin (zlasti vodno intenzivnih kultur, kot so riž, bombaž in koruza), pa tudi za živinorejo, predelavo hrane, pranje pridelkov in akvakulturo. Hkrati pa velik delež vode izhlapi ali se izgubi z neučinkovitimi namakalnimi sistemi, kar pomeni, da velik del odvzete vode ne doseže rastlin. Ob upoštevanju naraščajoče svetovne populacije, podnebnih sprememb in degradacije vodnih virov je jasno, da takšen način rabe ni več vzdržen. Rešitev se kaže v preobrazbi kmetijstva z uvedbo naprednih trajnostnih tehnologij, ki bistveno zmanjšujejo porabo vode in optimizirajo proizvodnjo. Trajnostne tehnologije v kmetijstvu v središče postavljajo učinkovito rabo virov, zmanjševanje okoljske obremenitve in večjo produktivnost na omejenem prostoru. Vertikalno kmetovanje uporablja večnivojske strukture (npr. stolpi, kontejnerji, zaprti prostori), pogosto v urbanih območjih, kar omogoča gojenje pridelkov v notranjih pogojih in zmanjšuje potrebo po obdelovalni



Slika 30: Svetovna poraba vode skozi leta 1900-2010.

(vir: https://www.researchgate.net/figure/Global-water-withdrawal-over-time-by-FAO_fig1_356173638)

V kmetijstvu se voda največ porablja za namakanje poljščin (zlasti vodno intenzivnih kultur, kot so riž, bombaž in koruza), pa tudi za živinorejo, predelavo hrane, pranje pridelkov in akvakulturo. Hkrati pa velik delež vode izhlapi ali se izgubi z neučinkovitimi namakalnimi sistemi, kar pomeni, da velik del odvzete vode ne doseže rastlin. Ob upoštevanju naraščajoče svetovne populacije, podnebnih sprememb in degradacije vodnih virov je jasno, da takšen način rabe ni več vzdržen. Rešitev se kaže v preobrazbi kmetijstva z uvedbo naprednih trajnostnih tehnologij, ki bistveno zmanjšujejo porabo vode in optimizirajo proizvodnjo. Trajnostne tehnologije v kmetijstvu v središče postavljajo učinkovito rabo virov, zmanjševanje okoljske obremenitve in večjo produktivnost na omejenem prostoru. Vertikalno kmetovanje uporablja večnivojske strukture (npr. stolpi, kontejnerji, zaprti prostori), pogosto v urbanih območjih, kar omogoča gojenje pridelkov v notranjih pogojih in zmanjšuje potrebo po obdelovalni

zemlji; na enakem prostoru lahko pridelek ob pravilni zasnovi preseže tradicionalne metode tudi za desetkrat. Povezano je s sistemom hidroponike, kjer rastline rastejo brez zemlje, hranila se dovajajo v vodni raztopini, recirkulacija vode pa omogoča uporabo za 90–95 % manj vode kot pri običajnem poljedelstvu; izgube zaradi izhlapevanja ali odtekanja so skoraj neznatne.

Takšni sistemi omogočajo tudi gojenje skozi vse leto, so zaščiteni pred vremenskimi ekstremi in drastično zmanjšujejo uporabo škropiv, saj kontrolirano okolje zmanjšuje prisotnost bolezni in škodljivcev, tehnologije, kot je aeroponika, pa dodatno optimizirajo porabo vode in hranil (do 95 % manj). Zaprte krmilne enote in senzorji omogočajo stalno spremljanje temperature, vlage, CO₂ – tako lahko natančno prilagodimo rastne pogoje in optimiziramo uporabo energije; vendar je poraba energije pomembna omejitev, še posebej v primeru umetne osvetlitve LED, ki mora biti podprta z obnovljivimi viri, da ohranimo okoljsko korist.

Poleg hidroponskih in vertikalnih sistemov se v trajnostnem kmetijstvu uveljavlja *tudi* precizno kmetijstvo, kjer IoT senzorji, droni, GPS-vodena oprema, satelitsko zaznavanje in umetna inteligenca omogočajo natančno spremljanje tal, vlage, stanja rastlin in zdravja živali. Tak pristop zmanjša porabo vode do 30 %, gnojil do 20–30 %, pesticidov do 30–35 % in obenem poveča pridelek v višini 10–20 %. Podatkovno podprte odločitve omogočajo prilagodljivo namakanje, ciljano gnojenje in zaščito pred škodljivci prav tam, kjer je treba, kar zmanjšuje ekološki odtis in obremenitev tal ter vodnih sistemov.

Sistemi, ki združujejo vertikalno hidroponsko gojenje in precizno tehnologijo, omogočajo visoko produktivnost in stabilno oskrbo s hrano v urbanih in podeželskih območjih. Ti sistemi so odporni na klimatske spremembe, saj delujejo neodvisno od sezonskih nihanj in ekstremnih vremenskih pojavov. Obenem skrbno zaključen cikel vode in hranil, nadzor okolja in recikliranje vode zmanjšujejo porabo naravnih virov in onesnaževanje. Kombinacija teh praks omogoča lokalno proizvodnjo sveže hrane v bližini potrošnikov, kar zmanjšuje transportne emisije in izboljšuje dostopnost kakovostnih pridelkov. Tako trajnostne tehnologije v kmetijstvu postajajo ključni gradnik za prihodnost živilskih sistemov, ki so učinkoviti, odporni in okoljsko prijazni.



Slika 31: Uporaba vertikalne aeroponike za pridelavo zelenjave.

(vir: <https://agrotonomy.com/>)

Opisane tehnologije so trajnostne zato, ker dolgoročno ohranjajo naravne vire, zmanjšujejo negativne vplive na okolje in omogočajo stabilno, lokalno in zanesljivo preskrbo s hrano. S tem ko vertikalno in hidroponsko kmetijstvo bistveno zmanjšujeta porabo vode, zemljišč in kemikalij, neposredno zmanjšujeta degradacijo tal, izčrpavanje vodonosnikov in onesnaževanje površinskih voda. Hkrati omogočata pridelavo hrane v urbanih območjih, s čimer se krajšajo transportne poti in zmanjšujejo emisije toplogrednih plinov. Precizno kmetijstvo pa z uporabo podatkovnih orodij

povečuje učinkovitost vsakega posameznega vložka – vode, gnojil, energije –, kar pomeni manj izgub, manj emisij in večji pridelek na enoto površine. Vse to skupaj pomeni, da takšno kmetijstvo zmanjšuje svoj ekološki odtis, ostaja gospodarsko vzdržno in družbeno sprejemljivo, kar so trije ključni stebri trajnostnega razvoja.

Viri: [9][19][23][27][30][47]

ZAJEMANJE, UPORABA IN SHRANJEVANJE OGLJIKA

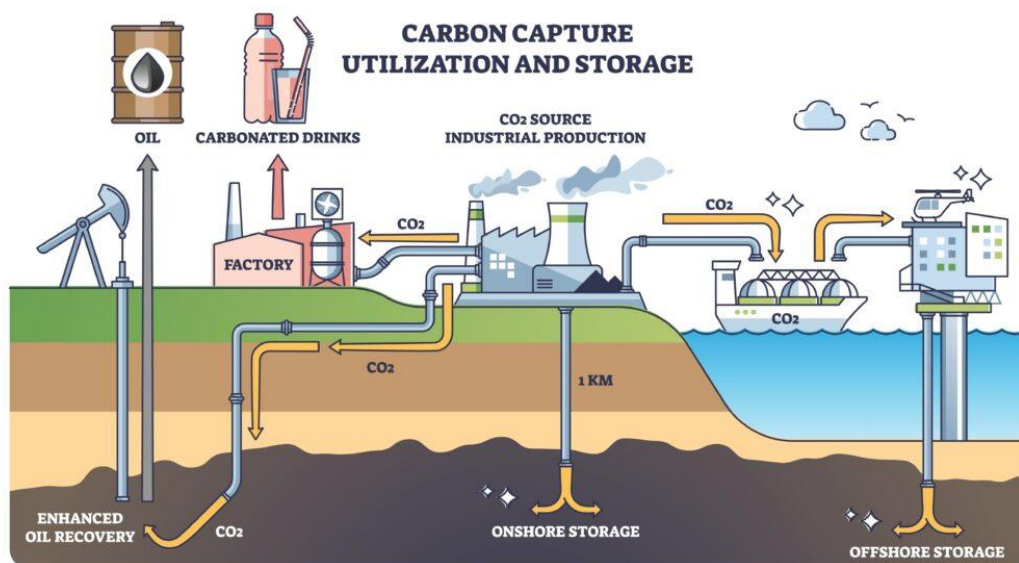
Zajemanje, uporaba in shranjevanje ogljika (Carbon capture and storage oz. CCS) je proces, pri katerem se ogljikov dioksid (CO_2) iz industrijskih obratov zajame, preden bi bil izpuščen v ozračje, nato pa se ga transportira na dolgoročno skladiščno lokacijo. CO_2 se običajno zajema iz velikih virov, kot so obrati za predelavo zemeljskega plina, nato pa se hrani v globokih geoloških formacijah. Približno 80 % letno zajetega CO_2 se uporablja za izboljšano pridobivanje nafte (angl. Enhanced oil recovery, v nadaljevanju EOR), pri čemer se CO_2 vbrizga v delno izčrpana naftna polja, da bi povečali izkoristek nafte, pri čemer večina CO_2 ostane pod zemljo. Ker proces EOR vključuje tako uporabo kot skladiščenje CO_2 , se CCS pogosto imenuje tudi zajemanje, uporaba in shranjevanje ogljika (Carbon capture, utilisation and storage oz. CCUS).

Podjetja v naftni in plinski industriji so postopke, povezane s CCS, prvič uporabila sredi 20. stoletja. Zgodnje tehnologije CCS so bile namenjene predvsem čiščenju zemeljskega plina in povečanju proizvodnje nafte. Od 80. let prejšnjega stoletja in še intenzivneje v 2000-ih je CCS postal predmet razprav kot strategija za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov. Kljub temu približno 70 % napovedanih CCS projektov ni bilo nikoli izvedenih, v elektroenergetskem sektorju pa je stopnja neuspeha presegla 98 %. Do leta 2024 je bilo CCS v uporabi v 44 obratih po svetu, kjer so skupaj zajeli približno tisočinko globalnih emisij ogljikovega dioksida. Kar 90 % operacij CCS je povezanih z naftno in plinsko industrijo. Obrati, ki uporabljajo CCS, za svoje delovanje potrebujejo dodatno energijo, kar pomeni, da pogosto kurijo več fosilnih goriv, s čimer se povečajo emisije, povezane z njihovim pridobivanjem in transportom.

CCS bi lahko imel ključno, a omejeno vlogo pri zmanjševanju emisij toplogrednih plinov. Druge možnosti za zmanjšanje emisij, kot so sončna in vetrna energija, elektrifikacija ter javni prevoz, so stroškovno ugodnejše in učinkovitejše pri zmanjševanju onesnaževanja zraka. Zaradi visokih stroškov in omejitev se CCS vidi kot uporabna tehnologija v specifičnih nišah, kot so težka industrija in posodobitve obstoječih obratov. Ob znatnem in dolgotrajnem zmanjšanju porabe zemeljskega plina lahko CCS prispeva k zmanjšanju emisij v obratih za njegovo predelavo. V proizvodnji električne energije in vodika se CCS obravnava kot dopolnilo širšemu prehodu na obnovljive vire energije. Prav tako je del koncepta bioenergije z zajemanjem in shranjevanjem ogljika (Bioenergy with carbon capture and storage oz. BECCS), ki lahko pod določenimi pogoji prispeva k odstranjevanju CO_2 iz ozračja.

Učinkovitost CCS pri zmanjševanju emisij ogljika je odvisna od stopnje zajemanja CO_2 , dodatne energije, potrebne za delovanje sistema, morebitnih uhajanj ter poslovnih in tehničnih težav, ki lahko preprečijo načrtovano delovanje obratov. Nekateri večji CCS projekti so shranili bistveno manj CO_2 , kot je bilo sprva predvideno. Ostaja tudi polemika glede uporabe zajetega CO_2 za povečano pridobivanje nafte, saj ni jasno, ali to dejansko prispeva k zmanjšanju vpliva na podnebje. Številne okoljske organizacije CCS vidijo kot nepreverjeno, drago tehnologijo, ki podaljšuje odvisnost od fosilnih goriv, medtem ko so drugi ukrepi za zmanjšanje emisij učinkovitejši in CCS zgolj odvrta pozornost od njih. Nekateri mednarodni podnebni sporazumi omenjajo koncept zmanjševanja emisij iz fosilnih goriv, čeprav ta ni natančno opredeljen, a se običajno razume kot vključevanje CCS. Skoraj vsi trenutno

delujoči CCS projekti so prejeli finančno podporo vlad. Države, ki imajo programe za podporo ali zahtevo po uporabi CCS tehnologij so: ZDA, Kanada, Danska, Kitajska in Združeno kraljestvo.



Slika 30: Proces CCUS.

(vir: <https://www.gexcon.com/blog/co2-hazards-in-carbon-capture-utilisation-and-storage-ccus/>)

Slika 30 prikazuje celoten proces tehnologije zajemanja, uporabe in shranjevanja ogljika. Na sredini slike je industrijski obrat, kjer nastajajo velike količine ogljikovega dioksida kot stranski produkt proizvodnje. Dim iz dimnikov ponazarja emisije toplogrednih plinov. CO₂ se ujame neposredno pri viru (npr. iz dimnih plinov v tovarnah) s pomočjo posebnih kemijskih in fizikalnih postopkov. Nato se usmeri skozi cevovode za nadaljnjo uporabo ali shranjevanje. Zajeti CO₂ se lahko ponovno uporabi v različnih industrijah: Karbonatizirane pijače (kot je soda); Povečanje izkoristka črpanja nafte (Enhanced Oil Recovery – EOR), kjer se CO₂ vbrizga v naftna polja, da izpodrine dodatno nafto. Če CO₂ ni mogoče uporabiti, ga je treba dolgoročno shraniti v geološke formacije: Onshore Storage (kopensko shranjevanje) – CO₂ se vbrizga več kot 1 km globoko v podzemne plasti kamnin, kjer ostane ujet. Offshore Storage (morsko shranjevanje) – CO₂ se pošilja z ladjo do morske platforme, kjer se nato vbrizga pod morsko dno. CO₂ lahko kroži med industrijo, uporabo in shranjevanjem, kar omogoča zmanjšanje emisij brez popolne ustavitve obstoječih industrijskih procesov.

Zgodovina in trenutno stanje

Tehnologija za odstranjevanje CO₂ iz zemeljskega plina je bila patentirana leta 1930. Leta 1972 so ameriške naftne družbe začele uporabljati CO₂ za izboljšano pridobivanje nafte (EOR). Kasneje so podjetja v Teksasu začela zajemati CO₂, proizveden v predelovalnih obratih, in ga prodajati za EOR. CCS kot metoda za zmanjšanje emisij CO₂ je začela pridobivati pozornost v 70. letih prejšnjega stoletja, ko je fizik Cesare Marchetti predlagal uporabo CCS za zmanjšanje emisij iz termoelektrarn in rafinerij. Prvi večji projekt je bil izveden na plinskem polju Sleipner na Norveškem, leta 1996. Leta 2005 je Medvladni odbor za podnebne spremembe izpostavil CCS, kar je povečalo vladno podporo tehnologiji, vendar je veliko projektov, ki so bili načrtovani za leto 2020, ostalo neizvedenih. Do julija 2024 je bilo komercialno CCS v uporabi v 44 obratih po svetu. Šestnajst obratov je bilo namenjenih ločevanju CO₂ iz zemeljskega plina, sedem za proizvodnjo vodika, amonijaka in gnojil, sedem za kemikalije, pet za električno energijo in toploto ter dva za rafiniranje nafte. CCS je bil uporabljen tudi v enem obratu za proizvodnjo železa in jekla. Poleg tega so tri naprave po svetu bile namenjene transportu/shranjevanju CO₂. Do leta 2024

je naftna in plinska industrija predstavljala 90% zmogljivosti delujočega CCS po svetu. Skupaj obrati zajamejo približno tisočinko globalnih emisij toplogrednih plinov. Osemnajst obratov je bilo v Združenih državah Amerike, štirinajst na Kitajskem, pet v Kanadi in dva na Norveškem. Avstralija, Brazilija, Katar, Savdska Arabija in Združeni arabski emirati so imeli po en projekt. Do leta 2020 je imela Severna Amerika več kot 8.000 km plinovodov za CO₂, v Evropi in na Bližnjem vzhodu pa sta bila dva sistema plinovodov za CO₂.

Pregled procesa

Objekti za zajem in shranjevanje ogljika zajemajo ogljikov dioksid, preden ta vstopi v ozračje. Običajno se za ločevanje CO₂ od drugih sestavin izpušnih plinov uporabljajo kemična topila ali porozni trdni materiali. Najpogostejše plinski tok prehaja skozi aminske topilo, ki veže molekule CO₂. To topilo, obogateno s CO₂, se nato segreje v regeneracijski enoti, kjer se ogljikov dioksid sprosti iz topila. Očiščen plin gre skozi nadaljnjo obdelavo, kjer se odstranijo nečistoče in prilagodi temperatura za kompresijo. Prečiščen CO₂ se nato stisne in transportira do skladišča ali za nadaljnjo uporabo, sproščena topila pa se reciklirajo za nadaljnje zajemanje CO₂ v obratu. Ko je CO₂ zajet, se običajno stisne v superkritično tekočino in vbrizga pod zemljo. Cevovodi so najcenejši način za transport velikih količin CO₂ po kopnem, v določenih primerih pa tudi na morju. Raziskave so pokazale možnost transporta CO₂ tudi po morju s pomočjo ladij. Možen je tudi prevoz s tovornjaki ali železnico, vendar to pomeni višje stroške na tono prepeljanega CO₂.

Procesi zajemanja

Procesi zajemanja in shranjevanja ogljika vključujejo več različnih tehnologij, ki delujejo skupaj. Tehnološke komponente se uporabljajo za ločevanje in obdelavo CO₂ iz plinske zmesi, njegovo kompresijo in transport, vbrizgavanje v podzemlje ter spremljanje celotnega procesa. Obstajajo trije načini ločevanja CO₂ iz plinske zmesi: zajem po zgorevanju, zajem pred zgorevanjem in oksigensko zgorevanje.

Pri zajemu po zgorevanju se CO₂ odstrani po zgorevanju fosilnega goriva. Tehnologija zajema pred zgorevanjem se pogosto uporablja v procesiranju zemeljskega plina. V tem primeru se fosilno gorivo delno oksidira, na primer v uplinjevalniku. Ogljikov monoksid (CO) iz nastale sintezne plinske mešanice (CO in H₂) reagira z dodatno paro (H₂O) ter se pretvori v CO₂ in H₂. Tako pridobljen CO₂ je mogoče zajeti iz razmeroma čistega izpušnega toka, preostali vodik (H₂) pa se lahko uporablja kot gorivo. Ta metoda ima svoje prednosti in slabosti v primerjavi z zajemom po zgorevanju. Pri oksigenskem zgorevanju gorivo gori v čistem kisiku namesto v zraku, kar pomeni, da sproščeni plini sestojijo predvsem iz CO₂ in vodne pare. Ko se vodna para kondenzira s hlajenjem, ostane skoraj čisti tok CO₂. Slabost te tehnike je potreba po veliki količini kisika, katerega proizvodnja je energetsko in stroškovno zahtevna.

Absorpcija oziroma kemijsko zajemanje ogljika z amini je najpogostejše uporabljena metoda za zajem CO₂. Med druge predlagane tehnologije za zajemanje CO₂ spadajo membranska plinska separacija, kemično zankasto zgorevanje, kalcijevo zankanje ter uporaba kovinsko-organskih ogrodij in drugih trdnih sorbentov. Nečistoče v tokovih CO₂, kot sta žveplov dioksid in vodna para, lahko pomembno vplivajo na njegove fizikalne lastnosti ter povečajo korozijo cevovodov in vrtin. V primerih, ko so v CO₂ prisotne nečistoče, je potrebno dodatno čiščenje plina, da se preprečijo neželeni stranski učinki.

Skladiščenje in izboljšano pridobivanje nafte

Shranjevanje CO₂ vključuje vbrizgavanje zajetega CO₂ v globoke podzemne geološke rezerve poroznih kamnin, ki jih prekriva neprepustna plast kamnin. Ta deluje kot tesnilo in preprečuje premikanje CO₂ proti površju ter njegovo uhajanje v ozračje. Plin se pred vbrizgavanjem običajno stisne

v superkritično tekočino, ki nato teče skozi rezervoar ter zapolni njegovo porozno strukturo. Da bi CO₂ ostal v tekočem stanju, mora biti rezervoar globlji od 800 metrov. Do leta 2024 je bilo približno 80 % zajetega CO₂ vsako leto uporabljenega za izboljšano pridobivanje nafte (EOR). Pri tej metodi se CO₂ vbrizga v delno izčrpana naftna polja, kjer se veže z nafto in zmanjša njeno gostoto, kar pospeši njen dvig proti površju. Poleg tega CO₂ poveča pritisk v rezervoarju, kar izboljša mobilnost nafte in poveča njen pretok proti proizvodnim vrtinam. Glede na lokacijo lahko EOR iz enega vbrizganega tona CO₂ pridobi približno dva dodatna sodčka nafte, pri čemer zgorevanje te nafte sprosti približno enako količino CO₂. Izločena nafta vsebuje del CO₂, ki ga je mogoče večkrat reciklirati in ponovno vbrizgati, kar lahko zmanjša izgube na samo 1 %, čeprav je ta postopek energetsko zahteven.

Približno 20 % zajetega CO₂ se vbrizga v namenska geološka skladišča, običajno globoke slane vodonosnike. To so plasti poroznih in prepustnih kamnin, nasičenih s slano vodo. Na globalni ravni imajo slane formacije večjo skladiščno zmogljivost kot izčrpana naftna polja. Namensko geološko shranjevanje je na splošno cenejše od EOR, saj ne zahteva visoke čistosti CO₂, poleg tega pa je primernih lokacij več, kar pomeni krajše cevovode. Raziskujejo se tudi druge možnosti shranjevanja CO₂. Ena od metod vključuje vbrizgavanje CO₂ v plasti premoga za izboljšano pridobivanje metana. Pri eks-situ mineralni karbonizaciji CO₂ reagira z rudarskimi odpadki ali alkalnimi industrijskimi ostanki in tvori stabilne minerale, kot je kalcijev karbonat. In-situ mineralna karbonizacija pa vključuje vbrizgavanje CO₂ in vode v podzemne kamnine, bogate z reaktivnimi minerali, kot je bazalt. Tam CO₂ hitro reagira s kamninami in tvori stabilne karbonatne minerale, pri čemer je tveganje za uhajanje CO₂ po končanem postopku skoraj ničelno. Eks-situ pomeni zunaj mesta nastanka, v kontekstu shranjevanja CO₂ to pomeni, da se ogljikov dioksid odstrani iz svojega prvotnega vira in nato kemično reagira z materiali, kot so rudarski odpadki ali industrijski ostanki, da tvori stabilne minerale (npr. kalcijev karbonat). To je v nasprotju z in-situ mineralizacijo, kjer se CO₂ vbrizga neposredno v podzemne kamnine, bogate z reaktivnimi minerali, in tam naravno reagira ter tvori stabilne karbonate.

Globalna zmogljivost za podzemno shranjevanje CO₂ je potencialno zelo velika in verjetno ne bo omejujoč dejavnik za razvoj tehnologije CCS. Ocenjena skupna skladiščna zmogljivost znaša med 8.000 in 55.000 gigatonami, vendar bo le manjši del teh zalog verjetno tehnično ali ekonomsko izvedljiv. Ocenjevanje zmogljivosti je še vedno negotovo, zlasti pri slanih vodonosnikih, kjer so potrebne dodatne raziskave in analize lokacij.

Dolgotrajno uhajanje CO₂

Pri geološkem shranjevanju CO₂ obstaja več mehanizmov zadrževanja. Strukturno zajetje oz. ujetje poteka s pomočjo neprepustne kamnine, imenovane kapna plast, ki preprečuje uhajanje CO₂. Topnostno ujetje pomeni, da se CO₂ raztopi v vodi, ki zapolnjuje porni prostor. Preostalo ujetje se zgodi, ko se CO₂ ujame v posamezne pore ali skupine por, medtem ko mineralno ujetje poteka z reakcijo CO₂ z rezervoarskimi kamninami, pri čemer nastajajo stabilni karbonatni minerali. Slednji proces poteka zelo počasi, skozi tisočletja. Po vbrizganju superkritični CO₂ običajno potuje navzgor, dokler ne naleti na kapno plast, pod katero se zadrži. Nato se širi vodoravno, dokler ne doseže morebitnih razpok. Če so v bližini vbrizgavanja prisotne geološke prelomnice, bi lahko CO₂ migriral proti površju in ušel v ozračje, kar bi lahko bilo nevarno za okolje. Prav tako lahko previsok pritisk ob vbrizgavanju povzroči razpoke v kamnini ali celo sproži potres. Čeprav raziskave kažejo, da bi bili taki potresi prešibki, da bi povzročili večjo škodo, bi lahko zadostovali za nastanek puščanja.

Po ocenah IPCC naj bi dobro upravljana skladišča zadržala več kot 99 % vbrizganega CO₂ za več kot tisoč let, pri čemer ta ocena velja z 66–90 % verjetnostjo. Napovedi dolgoročnih izgub temeljijo na zapletenih simulacijah, saj je praktičnih podatkov, meritev še vedno premalo. Če bi bile količine shranjenega CO₂ zelo velike, bi lahko tudi zgolj 1-odstotna izguba v tisočletju povzročila pomembne posledice za podnebje prihodnjih generacij.

Socialni in okoljski vplivi, ter stroški

Objekti s CCS porabijo več energije kot tisti brez, kar v nekaterih člankih radi imenujejo »energetska kazen«. Količina dodatne energije je odvisna od vira CO₂ – pri virih z visoko koncentracijo CO₂ je potrebna le dehidracija, stiskanje in črpanje, medtem ko pri virih z nizko koncentracijo, kot so elektrarne, ločevanje CO₂ zahteva več energije. Na primer, termoelektrarne na premog bi morale za enako proizvodnjo elektrike porabiti 14–40 % več premoga, plinske elektrarne pa 11–22 % več plina.

CCS lahko znatno poveča tudi porabo vode, npr. termoelektrarne na premog z zajemom CO₂ potrebujejo do 50 % več vode. Ker elektrarne in industrijski obrati s CCS porabijo več goriva, povečujejo tudi onesnaževanje zraka in negativne vplive rudarjenja ter pridobivanja fosilnih goriv. Težava so lahko tudi kemikalije, ki se uporabljajo pri zajemu CO₂, kot so amini, ki lahko sproščajo škodljive snovi. Poleg tega obstaja tveganje onesnaženja podtalnice zaradi uhajanja CO₂ ali premika slane vode v vodne vire.

Nenadna uhajanja CO₂ iz cevovodov ali skladišč lahko povzročijo resne zdravstvene težave, saj je CO₂ težji od zraka in se nabira pri tleh. Pri visokih koncentracijah lahko povzroči izgubo zavesti, krče ali celo smrt. Čeprav nesreče niso pogoste, so lahko hude, kot v primeru pretrganja cevovoda v Mississippiju leta 2020, kjer je bilo hospitaliziranih 45 ljudi.

Obstajajo pa tudi pozitivni vplivi, recimo CCS lahko pomaga ohraniti delovna mesta v industrijah, ki bi jih sicer zaprli zaradi emisij CO₂. Na primer, Nemčija ob načrtovanem zaprtju premogovnih elektrarn do leta 2038 namenja 40 milijard evrov za podporo prizadetim skupnostim, pri čemer bi CCS lahko zmanjšal stroške prehoda. Vendar pa je v številnih skupnostih, kjer so že obremenjeni z onesnaženjem, CCS sporen, saj podaljšuje obratovanje industrijskih obratov, namesto da bi spodbujal čistejše alternative. Gradnja CO₂ cevovodov v oddaljenih regijah pa je povezana tudi s socialnimi problemi, zaradi česar se nekatere domorodne skupnosti temu upirajo.

Stroški projekta, nizka stopnja pripravljenosti tehnologij za zajemanje in pomanjkanje prihodkov so glavni razlogi za prekinitev projektov CCS. Komercialni projekti običajno zahtevajo začetno naložbo do več milijard dolarjev. Po podatkih ameriške agencije za zaščito okolja bi CCS povečal stroške proizvodnje električne energije v termoelektrarnah na premog za 7 do 12 USD/MWh. Stroški CCS se močno razlikujejo glede na vir CO₂. Če objekt proizvaja mešanico plinov z visoko koncentracijo CO₂, kot pri predelavi zemeljskega plina, lahko zajemanje in stiskanje stane 15–25 USD/tono. Elektrarne, tovarne cementa in železarne proizvajajo bolj razredčene plinske tokove, kjer so stroški zajema in stiskanja med 40–120 USD/tono CO₂. V ZDA so stroški transporta CO₂ po cevovodih na kopnem med 2–14 USD/tono CO₂, večina kapacitet za skladiščenje pa je ocenjena na manj kot 10 dolarjev na tonu CO₂. Implementacije CCS vključujejo več različnih tehnologij, ki so močno prilagojene vsakemu posameznemu mestu, kar omejuje sposobnost industrije, da zmanjša stroške s pridobivanjem izkušenj.

Učinkovitost v trajnostnem razvoju

CCS je zelo draga tehnologija v primerjavi z drugimi načini za zmanjšanje emisij. Na primer, odstranjevanje CO₂ v termoelektrarnah na fosilna goriva poveča stroške za 50–200 EUR na tonu CO₂. Obstajajo številne možnosti za zmanjšanje emisij, ki so cenejše, kot so javni prevoz, električna vozila in ukrepi za večjo energetske učinkovitost, vendar pa smo pri tem odvisni od načina življenja ljudi. Veter in sončna energija sta običajno najcenejši načini za proizvodnjo električne energije, kar pomeni, da so termoelektrarne z CCS manj konkurenčne.

CCS ima majhno, a ključno vlogo pri zmanjševanju emisij toplogrednih plinov. Po ocenah IPCC bi popolno opustitev CCS povečalo stroške za doseg cilja omejitve globalnega segrevanja na 2 stopinji Celzija za 138%. Obsežna uporaba CCS pa bi bila predraga in tehnološko neizvedljiva. CCS ima potencial zmanjšati emisije v težki industriji (cement, kemična industrija, jeklarstvo), saj se velik del emisij pojavi

zaradi kemičnih procesov, ne samo zaradi gorenja goriv. Prav tako se lahko uporablja za obstoječe termoelektrarne in industrijska obrati, da se zmanjšajo njihove emisije.

Večina študij predvideva, da CCS zajame 85–90% CO₂ v dimnih plinih, vendar industrijski predstavniki trdijo, da je dejanska stopnja zajema nižja, okoli 75%. Učinkovitost CCS pri zmanjšanju emisij je odvisna od več dejavnikov, kot so dodatna energija, ki je potrebna za delovanje CCS, in morebitne uhajanje CO₂ po zajemu. V nekaterih primerih so se projekti izkazali za manj učinkovite, kot so predvidevali, kar je privedlo do nizkega zmanjšanja emisij.

Uporaba CCS v povezavi z EOR je kontroverzna, saj ta postopek zahteva veliko energije, ki ponovno povečuje emisije CO₂. Ko se nafta, pridobljena z EOR, opeče, se sprostijo dodatne emisije, kar lahko vodi do povečanja emisij v primerjavi z neuporabo CCS. Potem ni smiselno da se take metode sploh lotimo. Do leta 2023 CCS zajema le približno 0,1% svetovnih emisij (45 milijonov ton CO₂). Mednarodna agencija za energijo IEA in Medvladni posvetovalni odbor za podnebne spremembe IPCC napovedujeta, da bo CCS do leta 2030 zajel približno 1 milijardo ton CO₂. Tehnologije za CCS so še vedno v fazi razvoja in so počasne pri uvajanju, kar je privedlo do zmanjšanja vloge CCS v strategijah za zmanjšanje podnebnih sprememb. Nekateri strokovnjaki menijo, da je CCS kljub počasnemu napredku ključen za doseg ciljev, drugi pa menijo, da je potrebno preusmeriti napore v druge tehnologije, kot je obnovljiva energija.

Socialna dilema

CCS je bila tema političnih razprav že od začetka pogajanj v okviru UNFCCC (Okvirno konvencijo Združenih narodov o spremembi podnebja) v zgodnjih 90-ih letih in ostaja zelo deljena. Podjetja, ki se ukvarjajo z fosilnimi gorivi, močno promovirajo CCS kot inovativno in stroškovno učinkovito rešitev, ki omogoča podaljšanje uporabe fosilnih goriv. Poudarjajo, da bo CCS ključen za reševanje podnebnih sprememb, ne omenjajo pa možnosti zmanjšanja uporabe fosilnih goriv. Po podatkih Mednarodne agencije za energijo so investicije v sektorju nafte in plina leta 2023 dvakrat večje od tistih, ki bi bile potrebne za doseg cilja omejitve globalnega segrevanja na 1,5°C. Predstavniki industrije fosilnih goriv so imeli močno prisotnost na podnebnih konferencah ZN in zagovarjali jezik, ki podpira uporabo CCS, namesto zmanjšanja uporabe fosilnih goriv. Na podnebni konferenci ZN 2023 je bilo prisotnih vsaj 475 lobistov za CCS. Številne okoljske nevladne organizacije, kot je Friends of the Earth, so močno proti CCS. Kritiki menijo, da gre za drago in nepreverjeno tehnologijo, ki bo le podaljšala odvisnost od fosilnih goriv, pri čemer bi druge strategije za zmanjšanje emisij bile učinkovitejše.

V mednarodnih podnebnih pogajanjih je bilo sporno vprašanje, ali naj se postopoma opustijo fosilna goriva na splošno ali samo tista, ki ne uporabljajo tehnologije CCS. Na podnebni konferenci ZN 2023 je bilo doseženo soglasje o postopnem opuščanju uporabe neobdelanega premoga, vendar je bilo izraženo tudi veliko zaskrbljenosti zaradi nedoločenih izrazov, kot so "abated" (obdelana) in "unabated" (neobdelana). To je omogočilo možnost zlorabe, če se CCS uporablja le minimalno, na primer z zajemom le 30 % emisij.

Javna podpora za CCS je na splošno nizka, zlasti v primerjavi z drugimi možnostmi za zmanjšanje emisij. Pogoste skrbi so povezane z vprašanji, kot so varnost, stroški in vplivi, še posebej, če se negotovosti ne priznavajo. Raziskave kažejo, da se večja verjetnost za uspeh projektov povezuje z večjo vključitvijo skupnosti in prizadevanji za zmanjšanje škode.

Uporaba CCS v Evropi

Na Norveškem je zajem in shranjevanje ogljika del strategije za uskladitev izvoza fosilnih goriv z nacionalnimi cilji zmanjšanja emisij. Leta 1991 je norveška vlada uvedla davek na emisije CO₂ pri proizvodnji nafte in plina na morju. Ta davek, skupaj z ugodnimi in dobro raziskanimi geološkimi pogoji, je bil razlog, da se je podjetje Equinor odločilo za uvedbo CCS na plinskih poljih Sleipner in Snøhvit.

Leta 2022 je Danska napovedala do 5 milijard evrov subvencij za CCS z namenom zmanjšanja emisij za 0,9 milijona ton CO₂ do leta 2030. V Združenem kraljestvu načrt CCUS določa skupne obveznosti vlade in industrije za uvedbo tehnologij zajema, uporabe in shranjevanja ogljika (CCUS). Cilj je vzpostavitev štirih nizkoogljicnih industrijskih središč, ki bodo do leta 2030 zajela 20–30 milijonov ton CO₂ na leto. Septembra 2024 je britanska vlada napovedala 21,7 milijarde funtov subvencij v obdobju 25 let za projekte HyNet CCS in proizvodnje modrega vodika v Merseysideu ter za projekt East Coast Cluster v Teessideu.

Neposreden zajem ogljika iz zraka in shranjevanje

Neposreden zajem ogljika iz zraka in shranjevanje (Direct air carbon capture and sequestration oz. DACCS) uporablja kemične ali fizikalne procese za odstranjevanje CO₂ neposredno iz ozračja in njegovo dolgoročno shranjevanje. Za razliko od CCS, ki zajema emisije na izvoru, lahko DAC odstranjuje ogljik, ki je že prisoten v ozračju. Tako je uporaben tudi za zajem emisij iz virov, kot so letalski motorji. Do leta 2023 DACCS še ni bil vključen v sisteme trgovanja z emisijami, saj so stroški na tonu CO₂, ki presegajo 1000 evrov, bistveno višji od cen ogljika na teh trgih.

Povzetek

Čeprav se delež energije iz obnovljivih virov povečuje in energetska učinkovitost napreduje, zgolj zmanjševanje emisij ne bo zadostovalo za omejitev škodljivih vplivov podnebnih sprememb, še posebej ob naraščajočem svetovnem povpraševanju po energiji. Kumulativna količina CO₂ v ozračju je že tako visoka, da bo za doseg podnebnih ciljev nujno tudi njegovo neposredno odstranjevanje. Ena izmed ključnih tehnologij za ta namen je zajemanje, uporaba in shranjevanje ogljika (CCUS), ki omogoča nadaljnjo uporabo fosilnih goriv v sektorjih, kjer trenutno še ni izvedljivih nizkoogljicnih alternativ, ob hkratnem zmanjševanju emisij.

Zajem CO₂ temelji na različnih kemijskih in fizikalnih metodah, ki omogočajo njegovo ločevanje iz dimnih plinov ali neposredno iz ozračja. V ospredju raziskav so razvoj naprednih absorbentov, sorbentov in membranskih tehnologij, ki povečujejo učinkovitost ter zmanjšujejo stroške zajemanja. Zajeti CO₂ se lahko uporabi v proizvodnji sintetičnih goriv, kemični industriji, pri izboljšanju izkoristkov naftnih vrtin ali kot sestavina v določenih gradbenih materialih. Ti pristopi poleg zmanjševanja emisij prispevajo tudi k razvoju krožnega gospodarstva. Kljub temu pa obstoječe možnosti uporabe ne zadostujejo za obvladovanje vseh količin CO₂, ki jih je treba odstraniti iz ozračja, zato postajajo trajne rešitve shranjevanja, kot je vbrizgavanje v globoke geološke strukture, ključnega pomena.

Tehnologija CCUS se pri širši implementaciji sooča s številnimi izzivi. Med njimi izstopa visoka cena celotnega procesa – od zajemanja do transporta in končnega skladiščenja – ki zahteva obsežno in drago infrastrukturo. Dodatne ovire predstavljajo tudi družbeni in politični pomisleki, predvsem zaradi negotovosti glede dolgoročne varnosti podzemnega shranjevanja CO₂. Jasne regulativne smernice, finančne spodbude za industrijo ter nadaljnje raziskave in razvoj so zato nujni za povečanje dostopnosti in sprejemljivosti tehnologije.

»Ko se bo proces razogljčevanja z namenom doseganja mednarodnih ciljev krepil in stopnjeval, bo tehnologija zajemanja, uporabe in shranjevanja ogljika postala še pomembnejša za prehod na čisto energijo. Množična raba te tehnologije v elektroenergetiki in industriji je ključna za doseg različnih globalnih ciljev o zmanjšanju izpustov ogljika« so povedali v lanskoletnem spletnem seminarju z naslovom 'Najnovejše analize vpliva tehnologije CCUS na globalni, nacionalni in regionalni ravni', ki ga je pripravilo Ameriško združenje za energetska ekonomiko (USAAE). ^[6]

Kljub pomembnim priložnostim pa tehnologija CCUS prinaša tudi določene izzive. Eden izmed ključnih je visoka cena implementacije ter potreba po obsežni infrastrukturi za zajem, transport in shranjevanje CO₂. Poleg tega obstajajo vprašanja o dolgoročni varnosti shranjevanja ogljikovega dioksida v geoloških formacijah in morebitnih vplivih na okolje. Kljub temu pa mnogi strokovnjaki

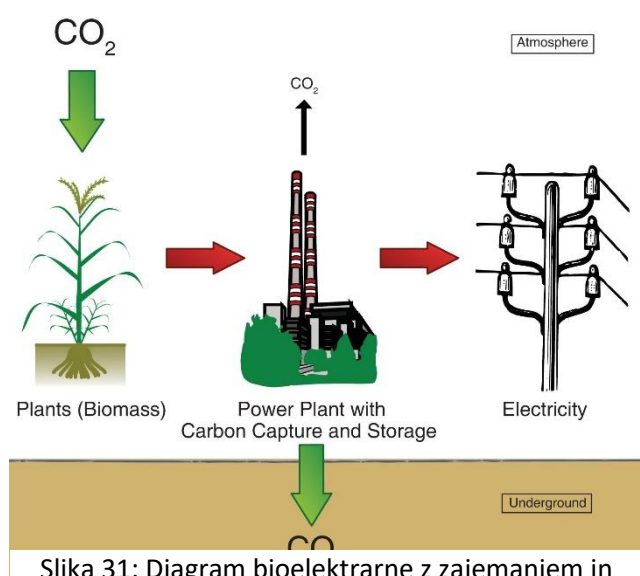
poudarjajo, da brez uporabe te tehnologije globalni podnebni cilji ne bodo dosegljivi, saj je povsem nemogoče, da bi vse industrijske procese v kratkem času nadomestili s popolnoma brezogljimi alternativami. Poleg samega shranjevanja zajetega ogljika pa obstajajo tudi različni načini njegove uporabe. CO₂ se lahko denimo uporablja pri proizvodnji sintetičnih goriv, v kemični industriji ali celo kot surovina v nekaterih gradbenih materialih. Ti pristopi ne zmanjšujejo le emisij, temveč spodbujajo tudi krožno gospodarstvo in razvoj novih trajnostnih rešitev. CCUS torej predstavlja eno izmed ključnih orodij v boju proti podnebnim spremembam, saj omogoča razogljičenje sektorjev, kjer druge alternative trenutno še niso dovolj razvite. Čeprav tehnologija še ni množično razširjena in se sooča s finančnimi ter logističnimi izzivi, pa lahko ob ustreznih politikah, investicijah in tehnološkem napredku postane pomemben del trajnostnega energetskega sistema prihodnosti.

Viri: [15][16][17][20][23][32][33][34][35][36][45][46][47][48]

Bioenergija s tehnologijo zajema in shranjevanja ogljika

V času, ko se človeštvo spopada z vse bolj očitnimi posledicami podnebnih sprememb, se uveljavljajo rešitve, ki presegajo zgolj zmanjševanje emisij. Med najbolj obetavnimi pristopi je tehnologija BECCS, kratica za »Bioenergy with Carbon Capture and Storage«, kar v slovenščini pomeni bioenergijo z zajemom in shranjevanjem ogljika. Gre za kombinacijo dveh tehnoloških področij: proizvodnje energije iz biomase ter zajema ogljikovega dioksida, ki nastaja pri tem procesu, z njegovim dolgoročnim skladiščenjem v geoloških formacijah. Ključna vrednost BECCS je prav v tem, da omogoča tako imenovane negativne emisije – torej dejansko odstranjevanje CO₂ iz ozračja.

Osnovni princip BECCS temelji na naravnem ogljičnem krogu rastlin. Rastline med svojo rastjo absorbirajo CO₂ iz atmosfere in ga pretvorijo v organsko snov. Ko to biomaso nato uporabimo kot gorivo za proizvodnjo energije – bodisi v obliki toplote, električne energije ali tekočih biogoriv – nastaja ogljikov dioksid. V običajnih razmerah bi se ta CO₂ sprostil nazaj v ozračje, a pri tehnologiji BECCS se ta tok preusmeri: CO₂ se zajame že ob izpustu, prečisti in nato shrani globoko pod zemljo v geološko stabilne kamnine, kjer lahko ostane ujet več tisoč let. Tako BECCS omogoča, da se CO₂, ki ga je rastlina absorbirala med rastjo, ne vrne v ozračje, kar pomeni dejanski neto odvzem toplogrednih plinov.



Slika 31: Diagram bioelektrarne z zajemanjem in shranjevanjem ogljika.

(vir: <https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frym.2015.00014/full>)

Na levi strani slike 28 so rastline, ki predstavljajo biomaso in absorbirajo CO₂ iz ozračja. Te rastline so nato uporabljene kot energijski vir v elektrarni, kjer se proizvede elektrika, hkrati pa se sprosti CO₂. Del tega CO₂ lahko uide v ozračje, a v okviru BECCS sistema se večina ujame in se, namesto da bi dodatno obremenila ozračje, transportira v podzemna skladišča. Na ta način BECCS ni le nevtralna, temveč potencialno tudi ogljično negativna tehnologija.

Uporaba biomase kot energenta ima sicer dolgo zgodovino, vendar pa BECCS presega tradicionalne načine rabe, saj vključuje visoko tehnološki zajem in geološko skladiščenje ogljika. Trenutno je največji operativni BECCS projekt v ZDA, kjer podjetje Archer Daniels Midland (ADM) v zvezni državi

Illinois zajema in shranjuje CO₂, ki nastaja pri proizvodnji etanola iz koruze. Projekt na leto odstrani približno milijon ton CO₂ iz ozračja. V Evropi pa je najopaznejši primer termoelektrarna Drax v Veliki Britaniji, ki že deluje na lesno biomaso in načrtuje polno uvedbo sistema zajema in shranjevanja ogljika. Ti projekti predstavljajo pomembne korake k širši uporabi BECCS, vendar pa tehnologija še ni razširjena na globalni ravni.

Kot pri vseh tehnologijah obstajajo tudi pri BECCS omejitve in izzivi. Eden ključnih pomislov je povezan z razpoložljivostjo trajnostne biomase. Če bi se globalno razširila praksa pridobivanja biomase za energetske namene, bi to lahko ogrozilo prehransko varnost, pospešilo krčenje gozdov ter vplivalo na biotsko raznovrstnost. Poleg tega je zajem in shranjevanje CO₂ tehnično zahteven in drag postopek, ki zahteva kompleksno infrastrukturo – od zajemnih enot do transportnih cevovodov in nadzorovanih skladišč. Kljub tem omejitvam številni podnebni modeli, vključno s tistimi, ki jih uporablja Medvladni forum za podnebne spremembe (IPCC), vključujejo BECCS kot ključno komponento scenarijev za omejitev globalnega segrevanja pod 1,5 °C. IPCC v svojem poročilu izpostavlja, da bi morali do konca stoletja odstraniti več sto milijard ton CO₂, pri čemer bi BECCS lahko prispeval bistveni delež.

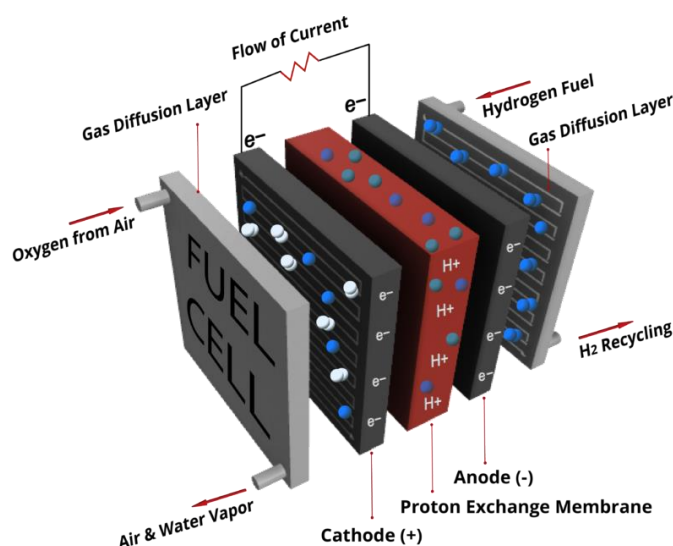
Dolgoročna uspešnost BECCS bo torej odvisna od več dejavnikov: razvoja cenovno dostopne tehnologije za zajem ogljika, vzpostavitve globalnih standardov za trajnostno rabo biomase ter mednarodnega sodelovanja pri gradnji skladiščne infrastrukture. Ključno bo tudi, da BECCS ne postane izgovor za nadaljnjo rabo fosilnih goriv, temveč sestavni del pravičnega energetskega prehoda k ogljično nevtralni družbi. V prihodnosti bo BECCS verjetno igral vlogo dopolnilne tehnologije – ne kot univerzalna rešitev, temveč kot nujni del širše sestavljanke, ki vključuje sončno in vetrno energijo, energetske učinkovitost, spremembe v prometu in industriji ter spodbujanje krožnega gospodarstva. Njegov največji potencial leži v sposobnosti, da preseže zgolj zmanjševanje škode in prispeva k aktivnemu reševanju že nastalih podnebnih posledic. Prav zaradi tega ostaja BECCS eno izmed najpomembnejših tehnoloških orodij v boju za stabilno podnebje in trajnostno prihodnost.

Viri: [15][16][17][23][32][33][35][45][46][48]

VODIKOVE ali GORIVNE CELICE

Vodikove celice so elektrokemijske naprave, ki neposredno pretvarjajo kemično energijo vodika in kisika v električno energijo. Za razliko od klasičnih metod, kjer se energija sprošča preko zgorevanja, v gorivnih celicah poteka reakcija pri nizkih temperaturah, brez mehanskega gibanja in z minimalnimi emisijami. Ključna značilnost teh celic je, da potrebujejo stalen dotok goriva – najpogosteje vodika – in oksidanta, običajno kisika iz zraka, s čimer lahko neprekinjeno proizvajajo električno energijo. Glavni produkt te reakcije je voda, kar predstavlja velik okoljski potencial, še posebej če je vodik proizveden iz obnovljivih virov. Vse vodikove celice imajo enako osnovno strukturo: anodo, katodo in elektrolit. Na anodi katalizator (pogosto platina) povzroči disociacijo vodika na protone in elektrone. Proton potuje skozi elektrolit, elektron pa teče skozi zunanji tokokrog, kjer ustvarja električni tok. Na katodi se protoni, elektroni in kisik spojijo v vodo, ki je glavni stranski produkt. Ker posamezna celica proizvede le okoli 0,7 V, se jih združuje v sklope (»stack«), da se dosežejo uporabne napetosti in tokovi. Konstrukcijske značilnosti gorivnih celic vključujejo vrsto elektrolita, pogosto platino kot katalizator na anodi ter nikljeve zlitine na katodi, in plinske difuzijske plasti, ki zagotavljajo enakomerno porazdelitev reaktantov in zaščito materialov. Celotna zasnova mora omogočati učinkovito ločevanje poti ionov in elektronov ter minimalizacijo izgub zaradi aktivacijskih, ohmskih in transportnih upadov napetosti. Pri visokih tokovih se namreč napetost v celici zmanjša, kar omejuje izhodno moč, zato je pri konstrukciji sklopov ključno uravnovežiti površino celic, število zaporednih povezav in hlajenje.

Med najbolj razširjenimi vrstami gorivnih celic so tiste s protonsko izmenjevalno membrano (PEMFC oz. »proton-exchange membrane fuel cell«), ki uporabljajo polimerno membrano (pogosto Nafion) kot elektrolit. Delujejo pri temperaturah do 80 °C, imajo hiter zagon in so zaradi nizkih emisij primerne za notranje okolje, kot so viličarji ali osebna vozila. Zahtevajo izredno čist vodik, saj so občutljive na kontaminacijo, predvsem z ogljikovim monoksidom. Njihova zgradba vključuje več plasti: membrane, katalizatorje in elektrode, ki skupaj tvorijo tako imenovano MEA (membrane electrode assembly). Poleg tega vsebujejo še bipolarne plošče za mehansko stabilnost in usmerjanje plinov. Za učinkovito delovanje PEMFC celic je ključno natančno uravnavanje temperature in vsebnosti vode. Membrana mora ostati navlažena, saj v nasprotnem primeru pride do povečanja upora in poškodb materiala. Preveč vlage pa lahko poplavi elektrodo in onemogoči dostop reaktantov do katalizatorja. Enako pomembno je uravnavanje toplote, saj eksotermna reakcija sprošča energijo, ki jo je treba enakomerno razporediti. Slabo upravljanje toplote lahko vodi v mehanske poškodbe zaradi toplotne razteznosti. Rešitve vključujejo elektrosmotske črpalke, posebne strukture plinskih poti in aktivne hladilne sisteme. Pomemben izziv ostaja visoka cena PEMFC celic, predvsem zaradi uporabe dragih katalizatorjev, kot je platina. Raziskave zato iščejo možnosti nadomestitve plemenitih kovin z dopiranimi ogljikovimi nanocevkami ali drugimi materiali, ki bi omogočili nižje stroške in hkrati ohranili visoko učinkovitost. Ameriško ministrstvo za energijo je leta 2013 ocenilo, da bi lahko ob serijski proizvodnji cena PEMFC padla na okoli 55–67 USD/kW, kar bi jo približalo konkurenčnosti z drugimi viri energije.



Slika 32: Zgradba gorivne celice s protonsko izmenjevalno membrano.

(vir: <https://powerup-tech.com/the-abc-of-fuel-cells/>)

Kemijske reakcije v gorivni celici:

Na anodi (oksidacija): $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

Na katodi (redukcija): $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Skupna reakcija: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{električna energija} + \text{toplota}$

Poleg PEMFC obstajajo še druge vrste celic, kot so alkalne (AFC oz. »Alkaline fuel cells«), ki uporabljajo raztopino KOH kot elektrolit in so bile zgodovinsko prve, uporabljene v vesoljskem programu Apollo. Fosforjeve celice (PAFC oz. »Phosphoric acid fuel cells«) delujejo pri višjih temperaturah in omogočajo izrabo toplote v kombiniranih sistemih, vendar so manj primerne za mobilne aplikacije zaradi večjih dimenzij in počasnega zagona. Posebno zanimanje predstavljajo visokotemperaturne celice, kot sta trdno oksidne (SOFC oz. »Solid oxide fuel cell«) in taljene karbonatne (MCFC oz. »Molten carbonate fuel cell«), ki omogočajo notranjo reformacijo goriva in dosežajo zelo visoke učinkovitosti, tudi do 85 %, če se toplota dodatno izrabi. Njihova slabost je

kompleksnost, visoka temperatura delovanja (do 1000 °C), dolgi zagonski časi in občutljivost materialov na toplotno obremenitev. Pri SOFC celicah se kot elektrolit uporablja keramika, najpogosteje YSZ (itrijev-stabiliziran cirkonijev oksid), ki omogoča prenos kisikovih ionov, kar pomeni, da se reakcija odvija v obratni smeri kot pri PEMFC – kisik potuje skozi elektrolit do anode, kjer reagira z vodikom. Ta tip omogoča uporabo raznovrstnih goriv, saj notranja reformacija pretvori ogljikovodike, kot so metan, dizel ali bioplin, v vodikove spojine že znotraj celice. S tem se zmanjša potreba po zunanem čiščenju goriva. Zaradi višjih temperatur delovanja lahko SOFC celice delujejo brez uporabe plemenitih kovin kot katalizatorjev, kar pomeni nižje stroške materialov, a višje zahteve po stabilnosti. MCFC celice uporabljajo elektrolit v obliki staljene karbonatne soli, ki omogoča neposredno reformacijo fosilnih goriv, kot je zemeljski plin, in recikliranje ogljikovega dioksida kot dela reakcije. To pomeni, da CO₂ ni samo nezaželen stranski produkt, temveč tudi reaktant. Sistem omogoča zelo visoke izkoristke, še posebej v kombinaciji s plinskimi turbinami. Slabost je visoka korozivnost elektrolita, dolgi zagonski časi in krajša življenjska doba komponent. Poleg klasičnih sistemov se raziskujejo tudi biogorivne celice, ki pretvarjajo organsko snov v elektriko s pomočjo encimov ali mikroorganizmov. Čeprav so še v zgodnji fazi razvoja in imajo nizko gostoto moči, kažejo obetavne možnosti za nišne aplikacije, kot so medicinski vsadki ali mikro senzorji, kjer so majhne dimenzije in nizke napetosti dovolj. Uporaba nanomaterialov, kot so grafen in ogljikove nanocevke, obeta dodatne izboljšave v stabilnosti, učinkovitosti in združljivosti s kompleksnimi sistemi.

Količina proizvedene energije iz posamezne gorivne celice je odvisna od njene velikosti, vrste in pogojev delovanja. Na primer, tipična PEMFC celica lahko proizvede okoli 1 kW moči na kvadratni decimeter površine MEA v optimalnih pogojih. V praksi to pomeni, da lahko sklop 100 celic z aktivno površino 100 cm² doseže okoli 5–10 kW električne moči, kar zadostuje za manjše električne vozilo ali stanovanjsko energetska enoto. V večjih sistemih, kot so stacionarne enote za kogeneracijo, lahko skupne moči presegajo 250 kW, medtem ko so modularne rešitve za industrijske potrebe sposobne proizvesti več megavatov elektrike. V transportu so gorivne celice vse bolj prisotne, zlasti v vozilih, kjer dolgi dosegi in kratki časi polnjenja predstavljajo prednost pred baterijami. Vozila na gorivne celice, kot je Toyota Mirai, dosegajo avtonomijo preko 500 km in se napolnijo v manj kot petih minutah. V logistiki se uporabljajo za pogon viličarjev, kjer omogočajo večizmensko delo brez dolgotrajnega polnjenja. Uporabljajo se tudi v vlakih, avtobusih in pomorskih aplikacijah, kjer je baterijska rešitev pogosto pretežka ali energetska nezadostna. Čeprav se tehnologija že uveljavlja v določenih segmentih, njena širša komercializacija ostaja pogojena z razvojem infrastrukture za proizvodnjo, shranjevanje in distribucijo vodika. Današnja izziva sta tudi standardizacija komponent in zmanjšanje stroškov, vendar napredek na področju materialov, predvsem membran in katalizatorjev, kaže obetavne trende. Zmanjševanje stroškov gorivnih celic, skupaj s politično podporo in okoljsko regulativo, nakazuje, da bodo v prihodnjih desetletjih igrale pomembno vlogo v trajnostni energetiki. Potencial je velik, zlasti v kombinaciji z obnovljivimi viri energije, kjer lahko vodik in gorivne celice služijo kot sredstvo za shranjevanje presežne energije ter zagotavljanje zanesljive oskrbe z elektriko, toploto in močjo tam, kjer druge tehnologije ne zadoščajo.

Viri: [57][58][59]

Jedrska energija kot OVE?

Jedrska energija je oblika energije, ki jo pridobivamo z jedrsko cepitvijo (fisijo) ali jedrskim zlitjem (fuzijo) atomskih jeder. Najpogosteje uporabljena tehnologija v obstoječih jedrskih elektrarnah temelji na cepitvi težkih elementov, zlasti urana-235. Čeprav je jedrska energija nizkoogljična in zagotavlja zanesljiv vir energije, njen status kot obnovljivega vira ostaja predmet strokovne in politične razprave. Večina pravnih in slovarskih definicij obnovljivih virov energije jedrske energije ne vključuje. Značilno je, da se OVE definirajo kot tisti, ki izvirajo iz naravnih procesov, ki se obnavljajo hitreje, kot jih porabljamo – npr. sončna, vetrna, hidroenergija in geotermalna energija tej definiciji ustrezajo. V tem

smislu uran-235, ki ga uporabljajo konvencionalni reaktorji brez reciklaže goriva, velja za neobnovljiv vir, saj se njegove zaloge sčasoma izčrpajo. Kljub temu obstajajo argumenti, ki jedrsko energijo, vsaj v določenih tehnoloških izvedbah, uvrščajo med potencialno obnovljive vire. Eden ključnih argumentov temelji na t. i. regenerativnih ali hitrih množitvenih (»breeder«) reaktorjih, ki proizvedejo več cepilnega materiala (npr. plutonij-239 iz urana-238 ali uran-233 iz torija) kot ga porabijo. Čeprav sta uran-238 in torij prav tako končna elementa, so njune razpoložljive količine na Zemlji ogromne. V zaprtih gorivnih ciklih z množilnimi reaktorji bi bilo možno iz teh materialov trajno proizvajati novo gorivo, kar ustvarja osnovo za klasifikacijo jedrske energije kot obnovljive – vsaj v dolgoročnem smislu, primerljivem z geotermalno energijo, katere izvor je prav tako radioaktivni razpad v zemeljski skorji.

Posebno zanimiva je tudi ideja izkoriščanja urana iz morske vode. Uran je prisoten v morjih v nizkih koncentracijah (okoli 3,3 ppb), vendar ogromna skupna količina morske vode pomeni skoraj neizčrpen vir. Znanstveniki so razvili materiale (npr. na osnovi hitina iz rakovinskih oklepov), ki omogočajo ekstrakcijo urana na način, ki bi ob dovolj velikem obsegu in tehnološki učinkovitosti lahko postal ekonomsko upravičen. Ob stalnem dotoku urana iz rečnih sedimentov in izluževanju iz morskega dna bi koncentracija urana v vodi ostajala skoraj konstantna, kar dodatno podpira argument o obnovljivosti tega vira.

Z razvojem naprednih reaktorjev, kot so taljeni soli hitri reaktorji (molten salt fast reactors), ki lahko učinkovito izrabijo večino aktinidov in zmanjšajo količino radioaktivnih odpadkov, se odpira pot k skoraj popolni izrabi jedrskega goriva. Takšni reaktorji bi v kombinaciji z izkoriščanjem urana iz morske vode dosegli letno porabo okoli 7 ton naravnega urana na gigavat proizvedene električne energije. To je primerljivo s količino urana, ki bi jo bilo možno pridobiti iz vode, uporabljene za hlajenje turbinskih sklopov elektrarne, kar dodatno utemeljuje status vira kot obnovljivega.

Pomemben potencial predstavlja tudi jedrska fuzija – proces zlivanja lahkih jeder, npr. devterija in tritija, pri čemer se sprošča ogromna količina energije. Glavna prednost fuzije je skoraj neizčrpen vir goriva, saj se devterij nahaja v morski vodi v znatnih količinah (približno 0,015 % vseh vodikovih atomov), medtem ko je litij, uporaben v drugih fuzijskih ciklih, prav tako dostopen v oceanskih zalogah. Če bo fuzijska tehnologija uspešno razvita, bi lahko pokrila svetovne energetske potrebe za milijone let. Na primer, devterij-licijev cikel bi zagotavljal zadostne zaloge za 60 milijonov let, medtem ko bi devterij-devterij fuzija zadostovala celo za do 150 milijard let pri trenutni svetovni porabi energije.

Vendar pa tudi v najbolj optimističnih scenarijih jedrska energija ostaja odvisna od razmeroma zapletenih tehnoloških in infrastrukturnih pogojev. Zlasti reciklaža goriva, razvoj množilnih reaktorjev, fuzijskih tehnologij in učinkovita ekstrakcija iz morske vode predstavljajo tehnološke in ekonomske izzive, ki še niso v celoti rešeni ali razširjeni na industrijsko raven. Kljub temu so nekatere ugledne institucije, kot je Brundtlandova komisija leta 1987, fuzijo in množilne fisijske reaktorje že uvrstile med obnovljive vire energije. Tako obstaja strokovna podlaga za razširjeno definicijo obnovljivosti, ki vključuje jedrsko energijo pod pogojem, da tehnologija omogoča neprekinjeno generiranje goriva iz obilnih naravnih virov in da se sistem zapre v zanki dolgotrajne razpoložljivosti goriva.

Sklepno lahko rečemo, da jedrska energija v klasični obliki (npr. lahkovodni reaktorji brez reciklaže) ne izpolnjuje pogojev obnovljivosti. Vendar pa pod določenimi pogoji – z uporabo regenerativnih reaktorjev, zaprtih gorivnih ciklov in izkoriščanjem urana iz morske vode – lahko pridobi status obnovljivega vira, predvsem z vidika dolgoročne vzdržnosti. To pa zahteva tehnološko napredne sisteme, dolgoročne investicije in jasne strateške usmeritve v energetske politiki.

Viri: [5][12][23][60][61]

Zaključek

Trajnostna prihodnost ni stvar enega samega ukrepa ali tehnologije, temveč preplet različnih pristopov, odločitev in predvsem vrednot, ki jih kot družba zastopamo. V tej seminarski nalogi sem poskušala predstaviti teme, ki so mi osebno najbolj zanimive in pomembne z vidika trajnosti – predvsem tehnologije zajemanja, uporabe in shranjevanja ogljika (CCUS) ter razmerje med porabo električne energije in globalno energetska (ne)enakostjo. Pri raziskovanju sem naletela tudi na številne druge tehnologije in vire, ki so prav tako ključni za prihodnost nizkoogljične družbe, vendar jih zaradi že tako velikega obsega seminarske naloge nisem mogla vključiti. Upam pa, da bo tisti, ki bo to bral, iz te naloge vseeno odnesel vsaj nekaj uporabnega – če ne konkretnih informacij, pa vsaj kakšno spodbudo za razmislek o tem, kam kot družba gremo in čemu bi morali kot človeštvo resnično strmeti. Vsak bo imel svoje mnenje o tem, kateri viri energije so »najboljši«, najbolj trajnostni ali najprimernejši. A če se kot izobražena družba v nečem lahko strinjamo, je to to, da moramo nehati onesnaževati ta naš planet, da moramo postati bolj odgovorni. Ne samo v smislu materialnih dobrin, temveč tudi v odnosu do energije – ker ni samoumevna, ni neomejena, in jo prepogosto razsipamo brez razmisleka. Vedno več hočemo, a redko kdaj pomislimo, kaj vse to "več" res stane in kje bomo za to morali plačati. Spomnim se, kako so nam že v osnovni šoli govorili, naj ugašamo luči, ko zapustimo prostor. Ironično, mislim, da bi takšna opozorila danes morali slišati predvsem odrasli – predvsem v mestih, kjer je poraba energije najvišja, svetlobno onesnaženje ogromno in kjer bi lahko z malo volje in pameti takoj prihranili velike količine energije. Podobno velja tudi za vsakdanje prizore nekaterih trgovin z odprtimi hladilniki, kjer se izgublja hlad, in s tem po nepotrebnem troši elektrika. In čeprav se morda komu to zdi malenkost, so to še vedno majhne podobe velikega problema – da porabo jemljemo kot nekaj normalnega in neomejenega. Pa to še ni nič v primerjavi s tem, koliko energije porabi industrija. Ne glede na to, da se zdaj vsi množično usmerjamo v električne avtomobile, v prihodnosti ne bo največja poraba elektrike v prometu, ampak še vedno v industriji in doma – tam, kjer ljudje živimo, se ogrevamo, hladimo, kuhamo, gledamo TV in polnimo vse mogoče naprave. Seveda pa v Sloveniji nimamo niti dovolj razvitega električnega omrežja, da bi resno podprli množično širitev e-mobilnosti. Nimamo dovolj polnilnic, kapacitet, infrastrukture, veliko stvari še manjka. In ne smemo pozabiti, da največ elektrike – in hkrati tudi emisij – še vedno prihaja iz držav, kot so Kitajska, ZDA in Indija. Res je, da imajo ogromno prebivalcev, a številke jasno kažejo, da je razsipna predvsem industrijska panoga. Njihove odločitve močno vplivajo na globalno ravnovesje in posledično tudi na države, ki sploh nimajo dostopa do elektrike. Ljudje v Čadu in Burundiju ne potrebujejo Tesel – potrebujejo osnovno razsvetljavo in zanesljiv vir energije za pitno vodo, zdravstvo in izobraževanje. Če si torej želimo resnično trajnostne prihodnosti, potem moramo razmišljati širše. Ne samo o tem, kako bomo mi v bogatejših državah zmanjšali svoj ogljični odtis in se zaradi tega boljše počutili, ampak tudi o tem, kako bomo zagotovili pravičen dostop do energije za tiste, ki ga še nimajo. Ker če mi tukaj »kurimo štrom« za udobje, tam pa še vedno kurijo dizel, ker nimajo druge izbire, potem to preprosto ni rešitev. Je samo iluzija napredka. Na koncu se moramo vprašati: koliko energije zares potrebujemo – in koliko je samo razvada? Trajnost ni zgolj vprašanje tehnologije, ampak predvsem kulture, odnosa do porabe, odgovornosti in solidarnosti. Brez zavedanja, da ima vsaka porabljena kilovatna ura svoj izvor, posledico in vpliv, ne bo spremembe. Tehnološki napredek je orodje, a smer mu določamo ljudje. In čeprav rešitve obstajajo, je vprašanje, ali jih bomo pravočasno sprejeli – ali bomo čakali, da nas k temu prisilijo posledice.

Viri

- [1] UNESCO. (2015). *Education for sustainable development*. <https://www.unesco.org/en/sustainable-development/education>
- [2] World Commission on Environment and Development. (1987, arhivirano 2007). *Our common future*. Oxford University Press. Skenirano poročilo Bruntlandove komisije Združenim narodom. https://web.archive.org/web/20070202210431/http://www.are.admin.ch/are/en/nachhaltig/international_uno/unterseite02330/
- [3] MacKay, D. J. C. (2013). *Trajnostna energija – brez razgretega ozračja* [E-knjiga]. Energetika.Net. http://www.en-lite.si/static/uploaded/pdf/Trajnostna_energija_tisk.pdf
- [4] Glavič, P., Levičnik, H., & Muhič, M. (2023). *Trajnostna, konkurenčna, ustvarjalna in uspešna Slovenija 2030?* [PDF, e-učilnica FGG, predmet TI-1879-0].
- [5] Mihalič, R. (2020). *Energetika za vsakogar in za vse ostale*. Tehniška založba Slovenije.
- [6] Davis, T. (1992, na spletu arhivirano 2009). *What is sustainable development?* <https://web.archive.org/web/20090907093326/http://www.menominee.edu/sdi/whatis.htm>
- [7] Hojkar, D. (2023). *Določanje ogljičnega odtisa poslovanja na področju energetskega pogodbeništv* [Magistrsko delo, Fakulteta za strojništvo, UL].
- [8] Hänggi, S., Elbert, P., Bütler, T., Cabalzar, U., Teske, S., Bach, C., & Onder, C. (2019). *A review of synthetic fuels for passenger vehicles*. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248471830266X>
- [9] International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. IEA. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [10] Holechek, J. L., Geli, H. M., Sawalhah, M. N., & Valdez, R. (2022). *A global assessment: Can renewable energy replace fossil fuels by 2050? Sustainability*. <https://par.nsf.gov/biblio/10388850-global-assessment-can-renewable-energy-replace-fossil-fuels>
- [11] Siol.net. (2023). *Ustrezne tehnologije za trajnostne izzive že imamo – gonilna sila bo umetna inteligenca*. <https://siol.net/novice/digisvet/ustrezne-tehnologije-za-trajnostne-izzive-ze-imamo-gonilna-sila-bo-umetna-inteligenca-630925>
- [12] Trajnostna energija. (b. d.). *Trajnostno okrevanje zahteva nizkoogljične tehnologije*. <https://www.trajnostnaenergija.si/trajnostno-okrevanje-zahteva-nizkooglji%C4%8Dne-tehnologije>
- [13] Repovž, G. (2023). *Iluzija o zelenem prehodu do leta 2050. Delo*. <https://www.delo.si/sobotna-priloga/iluzija-o-zelenem-prehodu-do-leta-2050>
- [14] REN21. (2019). *Global status report (renewable energies)*. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
- [15] Elsevier. (b. d.). *Open access options – Carbon Capture Science & Technology*. <https://www.sciencedirect.com/journal/carbon-capture-science-and-technology/publish/open-access-options>
- [16] Breakthrough Institute. (b. d.). *Livestock don't contribute 14.5% of global greenhouse gas emissions*. <https://thebreakthrough.org/issues/food-agriculture-environment/livestock-dont-contribute-14-5-of-global-greenhouse-gas-emissions>
- [17] International Energy Agency. (b. d.). *Direct air capture*. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>
- [18] Wikipedia. (b. d.). *Seznam največjih elektrarn na svetu*. https://sl.wikipedia.org/wiki/Seznam_najve%C4%8Djih_elektrarn_na_svetu
- [19] Climate Central. (b. d.). *Različni članki in podatki o podnebnih spremembah*. <https://www.climatecentral.org>
- [20] IEEE. (b. d.). *Sustainable Climate News & Standards*. <https://sustainable-climate.ieee.org/news/standards-green-tech/>
- [21] Šubic, I. (2023). *Nevarnost padca z energijske pečine. Delo*. <https://www.delo.si/sobotna-priloga/nevarnost-padca-z-energijske-pecine>
- [22] Montoya, F. G. (2014). *Renewable energy and sustainable development*. *Google Books*. https://books.google.si/books?id=wQhpDwAAQBAJ&redir_esc=y
- [23] EcoCertify. (b. d.). *Sustainable technologies*. <https://www.ecocertify.org/sl/eco-friendly/sustainable-technologies/>
- [24] Goldemberg, J. (2021). *The energy needs of the future*. *National Center for Biotechnology Information (NCBI)*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8641874/>
- [25] UNESCO. (b. d.). *What is ESD?* <https://en.unesco.org/themes/education-sustainable-development/what-is-esd/sd>
- [26] Kates, R. W., Parris, T. M., & Leiserowitz, A. A. (2018). *What is sustainable development? Goals, indicators, values, and practice*. *Sustainability Science*, 13(1), 1–9. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11625-018-0627-5>
- [27] Fraser, D. (2016). *Animal ethics and sustainability*. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 29(2), 255–264. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10806-015-9578-3>
- [28] Encyclopedia Britannica. (b. d.). *Sustainability*. <https://www.britannica.com/science/sustainability>

- [29] Ekioglas. (b. d.). *Kako znati šta je pravi organski proizvod prilikom kupovine*. <https://www.ekioglas.ba/edukacija/178/kako-znati-sta-je-pravi-organski-proizvod-prilikom-kupovine>
- [30] Fair Trade Federation. (b. d.). *What is fair trade?* <https://www.fairtradefederation.org/what-is-fair-trade/>
- [31] ITpedia. (2023). *Strategie voor duurzame technologie is cruciaal*. <https://sl.itpedia.nl/2023/01/07/strategie-voor-duurzame-technologie-is-cruciaal>
- [32] International Energy Agency. (b. d.). *Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS)*. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- [33] Rao, C. S. (2007). *Environmental Pollution Monitoring and Control* (2nd ed.). New Age International. https://books.google.si/books?id=TAK21grzDZgC&redir_esc=y
- [34] Royal Society of Chemistry. (b. d.). *Energy & Environmental Science* [Scientific Journal]. <https://www.rsc.org/journals-books-databases/about-journals/energy-environmental-science>
- [35] U.S. Department of Energy. (b. d.). *Direct Air Capture explained*. <https://www.energy.gov/science/doe-explainsdirect-air-capture>
- [36] REN21. (b. d.). *Global status report (renewable energies)*. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report>
- [37] Our World in Data. (b. d.). *Wind generation by country (2000–2021)*. <https://ourworldindata.org/grapher/wind-generation?tab=chart&yScale=linear&time=2000..2021&country=CHN~USA~DEU~IND~GBR>
- [38] Eko sklad. (b. d.). *Različni viri o trajnostni energiji*. <https://www.ekosklad.si>
- [39] HSE. (b. d.). *Različni podatki in publikacije o slovenski energetiki*. <http://www.hse.si>
- [40] Our World in Data. (b. d.). *Renewable energy*. <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- [41] International Energy Agency. (2014). *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy – 2014 edition*. https://web.archive.org/web/20141001012612/http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf
- [42] HSE. (b. d.). *SE Prapretno*. <https://www.hse.si/sl/se-prapretno>
- [43] Siol.net. (2023). *Slovenija lani z eno največjih rasti števila sončnih elektrarn v EU*. <https://siol.net/novice/posel-danes/slovenija-lani-z-eno-najvecjih-rasti-stevila-soncnih-elektrarn-v-eu-628018>
- [44] Fakulteta za elektrotehniko, UL. (b. d.). *Stanje sončnih elektrarn v Sloveniji*. <http://pv.fe.uni-lj.si/sl/podatki/stanje-se/#!>
- [45] Mandys, F., et al. (2023). *Framework for evaluating the carbon intensities of electricity generation supply and use in Europe*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Framework-for-evaluating-the-carbon-intensities-of-electricity-generation-supply-and_fig2_371827556
- [46] Energy.gov. (b. d.). *DOE Explains: Direct Air Capture*. <https://www.energy.gov/science/doe-explainsdirect-air-capture>
- [47] Royal Society of Chemistry. (b. d.). *Energy & Environmental Science* [Journal information]. <https://www.rsc.org/journals-books-databases/about-journals/energy-environmental-science>
- [48] Gexcon. (2023). *CO₂ hazards in carbon capture, utilisation and storage (CCUS)*. <https://www.gexcon.com/blog/co2-hazards-in-carbon-capture-utilisation-and-storage-ccus>
- [49] Encyclopædia Britannica. (b. d.). *Tidal power*. <https://www.britannica.com/science/tidal-power>
- [50] U.S. Department of Energy. (b. d.). *Hydropower basics*. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. <https://www.energy.gov/eere/water/hydropower-basics>
- [51] Maher, R. (2006). *Three Gorges Dam* [PDF dokument]. Montana State University. https://www.montana.edu/rmaher/engr125_fl06/Three%20Gorges%20Dam.pdf
- [52] U.S. Geological Survey. (b. d.). *Three Gorges Dam, China*. Earthshots: Satellite Images of Environmental Change. <https://eros.usgs.gov/earthshots/three-gorges-dam-china>
- [53] International Energy Agency. (b. d.). *Wind*. <https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind>
- [54] Repsol. (b. d.). *Wind farms: What are they and how do they work?*. <https://www.repsol.com/en/energy-and-the-future/future-of-the-world/wind-farms/index.cshtml>
- [55] TheWindPower.net. (b. d.). *Global database on wind farms*. <https://www.thewindpower.net/>
- [56] ScienceDirect. (b. d.). *Osmotic power*. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/osmotic-power>
- [57] Goriška lokalna energetska agencija (GOLEA). (b. d.). *Gorivne celice* [PDF dokument]. https://www.golea.si/wp-content/uploads/2017/02/Gorivne_celice.pdf
- [58] Laboratorij za razmere in tehnologije materialov (LRTME), Fakulteta za elektrotehniko UL. (b. d.). *Gorivne celice* [PDF predstavitev]. https://lrtme.fe.uni-lj.si/lrtme/slo/mate_tehn/Gorivne%20celice.pdf
- [59] FuelCell Energy. (b. d.). *Več vsebin o gorivnih celicah*. <https://www.fuelcellenergy.com/>
- [60] Delo. (2023, avgust 21). *Jedrsko energija je idealna kombinacija obnovljivih virov*. <https://www.delo.si/delov-poslovni-center/energetika/jedrsko-energija-je-idealna-kombinacija-obnovljivih-virov>
- [61] Varčevanje-energije.si. (2023, oktober 12). *Jedrsko energija – le nujno zlo pri prehodu na OVE?*. <https://www.varcevanje-energije.si/energetika.net/jedrsko-energija-le-nujno-zlo-pri-prehodu-na-ove/>
- [62] PeF UL. (b. d.). *APA 7 – citiranje virov*. <https://vodici.pef.uni-lj.si/subjects/guide.php?subject=apa7#box-undefined>